

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
FAKULTA TEXTILNÍ

# DIPLOMOVÁ PRÁCE



**LIBEREC 2010**

**OLGA PÝRKOVÁ**

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**FAKULTA TEXTILNÍ**  
**KATEDRA NETKANÝCH TEXTILÍ**

**Studijní program:** M3106 Textilní inženýrství  
**Studijní obor:** Netkané textilie

Vztah mezi strukturními parametry a filtračními vlastnostmi  
nanovlákněné vrstvy

Relation between structural parameters and filter properties of  
nanofibers layer

Autorka diplomové práce: Olga Pýrková

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jakub Hrůza, Ph.D.

Počet stran textu: 72

Počet obrázků: 16

Počet tabulek: 13

Počet grafů: 12

Počet příloh: 3

## Prohlášení

Prohlašuji, že předložená *diplomová* práce je původní a zpracovala jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušila autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

Souhlasím s umístěním *diplomové* práce v Univerzitní knihovně TUL.

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědoma toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci, dne 14. června 2010

.....

Olga Pýrková

## **Poděkování**

Ráda bych poděkovala vedoucímu diplomové práce panu Ing. Jakubovi Hrůzovi Ph.D. za jeho ochotu, trpělivost, cenné rady a čas který mi mohl věnovat při vzniku této práce. Také bych chtěla poděkovat společnosti Elmarco za poskytnutý materiál.

## **Anotace**

Tato diplomová práce se zabývá problematikou filtrace vzdušnin se zaměřením na filtrační vlastnosti nanovláknenných vrstev, strukturní parametry a metody jejich hodnocení. Cílem práce je porovnat vztah mezi strukturními parametry a filtračními vlastnostmi zjištěnými na základě experimentu a na základě výpočtu. V rámci této práce byly testovány vzorky s nanovláknennou vrstvou polyamidu. U všech vzorků byly testovány filtrační vlastnosti (efektivita, tlakový spád) a základní strukturní parametry (průměr vláken, tloušťky vrstvy, zaplnění, jemnost vláken, velikosti pórů). Důraz byl kladen na určení vhodné materiálové konstanty pro výpočet velikosti pórů na základě znalosti ostatních parametrů.

## **Annotation**

This diploma work deals with the air filtration with a view to filtration properties of nanofibres layers, structural parameters and methods of their evaluation. Main aim of the diploma work is to compare relation between structural parameters and filtration properties measured on the experimental basis and on the calculation basis. In the frame of this work were tested samples with polyamide nanofibres layer. For all samples were tested filtration properties (efficiency, hydraulic gradient) and basic structural parameters (diameter of fibres, layer thickness, filling, layer softness, sizes of voids). Accent was put on the determination of suitable material constant for sizes of voids calculation on the base of other parameters knowledge.

## **Klíčová slova**

Filtrace

Filtrační vlastnosti

Strukturní parametry

Nanovlákná

## **Key words**

Filtration

Filtration properties

Structural parameters

Nanofibers

# OBSAH:

<b>Seznam použitých symbolů a zkratk</b>	<b>9</b>
<b>1 ÚVOD</b>	<b>11</b>
<b>2 TEORETICKÁ ČÁST</b>	<b>12</b>
2.1 Filtrace	12
2.1.1 Definice filtrace a základní rozdělení	12
2.2 Filtrační parametry	13
2.2.1 Parametry filtračního materiálu	14
2.2.2 Parametry filtrovaných částic	15
2.2.3 Parametry procesu filtrace	17
2.3 Filtrační mechanismy	18
2.4 Filtrační vlastnosti	19
2.4.1 Efektivita	19
2.4.2 Tlakový spád	20
2.4.3 Životnost filtru	21
2.4.4 Odolnost vůči vnějším vlivům	21
2.4.5 Další vlastnosti související s filtrací	21
2.5 Povrchová a hloubková filtrace	22
2.5.1 Vybrané druhy filtrů	23
2.5.2 Struktura filtrů	23
2.6 Strukturní parametry vláknenného materiálu	24
2.7 Nanovláknna	30
2.7.1 Vlastnosti a použití nanovláken	31
2.7.2 Technologie výroby	32
2.7.3 Porovnání nanovláken s ostatními filtračními materiály	35
<b>3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b>	<b>36</b>
3.1 Cíl práce	36
3.2 Strukturní parametry nanovláknenné vrstvy na základě experimentu	36
3.2.1 Průměry vláken	36
3.2.2 Tloušťky vrstvy	40
3.3 Strukturní parametry nanovláknenné vrstvy na základě výpočtu	42
3.4 Filtrační vlastnosti a velikosti póru na základě experimentu	45
3.4.1 Testování filtračních vlastností aerosolem NaCl	45
3.4.2 Testování velikosti pórů bublinkovou metodou	48
3.5 Strukturní parametry ve vztahu s filtračními vlastnostmi	51
3.6 Velikosti pórů na základě výpočtů a určení vhodné materiálové konstanty	53

3.6.1	Závislost filtračních vlastností na velikosti pórů získaných výpočtem.....	62
<b>4</b>	<b>DISKUSE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>64</b>
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>67</b>
<b>6</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>69</b>
<b>7</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>72</b>



## Seznam použitých symbolů a zkratek

Q	průtok vzduchu [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
A	plocha vrstvy [ $\text{m}^2$ ]
$\Delta p$	tlakový spád [Pa]
t	tloušťka vrstvy [m]
$k_p$	koeficient propustnosti vrstvy [ $\text{m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
$\mu\text{m}$	mikrometr, $10^{-6}$ [m]
nm	nanometr, $10^{-9}$ [m]
mV	milivolt, $10^{-3}$ [V]
kV	kilovolt, $10^3$ [V]
E	efektivita zachycených částic [%]
$E_c$	celková efektivita filtrace [%]
$E_s$	efektivita jednoho vlákna [%]
$E_{\text{stř}}$	střední hodnota efektivy [%]
G	množství disperzního podílu [g]
J	jímavost filtru [g]
$\mu$	zaplnění [-]
T	jemnost vláken [tex]
tex	jednotka jemnosti [ $\text{g} \cdot \text{km}^{-1}$ ]
m	hmotnost [g]
$m_p$	plošná hmotnost [ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ]
$m_v$	objemová hmotnost [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
v	rychlost náletu částic na filtr [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
V	objem vláken [ $\text{m}^3$ ]
$V_c$	celkový objem vlákenného útvaru [ $\text{m}^3$ ]
s	kruhový průřez vláken [ $\text{m}^2$ ]
S	plocha filtrů, řezů vláken [ $\text{m}^2$ ]
$S_c$	celková průřezová plocha [ $\text{m}^2$ ]
$\rho$	měrná hmotnost (hustota) vlákenného materiálu [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
$\rho_{\text{vl}}$	měrná hmotnost (hustota) vláken [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
$\rho_{\text{PAD}}$	měrná hmotnost (hustota) polyamidu [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
d	průměr vláken [m]
$d_p, D$	ekvivalentní průměr póru [m]
$\pi$	„pí“, hodnota 3,14 [-]
$\psi$	poróznost [-]

$l$	délka vláken [m]
$L$	délka póru [m]
$L_p$	délka pórovitých kapilár ve vlákenném útvaru [m]
$p$	obvod vláken [m]
$p_p$	obvod příčného řezu pórem [m]
$q$	tvarový faktor průřezu vláken [-]
$q_p$	tvarový faktor póru [-]
$H$	délka porózního materiálu [m]
$k$	vhodná konstanta [-]
$a$	vhodný parametr [-]
$\gamma$	povrchové napětí [ $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ ]
$\gamma_{vl}$	objemový povrch vláken [ $\text{m}^{-1}$ ]
$\eta$	dynamická viskozita vzduchu [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]
$\sigma$	směrodatná odchylka
IS	interval spolehlivosti
$F_\gamma$	síla daná povrchovým napětím [N]
$F_p$	síla daná vnějším tlakem [N]
$\bar{k}_5$	průměrná hodnota 5-ti vzorků [-]
$\bar{k}_3$	průměrná hodnota 3 vybraných vzorků [-]
PA 6	polyamid 6
NaCl	chlorid sodný
Phenom	vysokorozlišovací stolní rastrovací elektronový mikroskop
apod.	a podobně
atd.	a tak dále
tzv.	tak zvané
tzn.	to znamená
aj.	a jiné
viz.	prohlédni
např.	například
popř.	popřípadě
resp.	respektive
obr.	obrázek
tab.	tabulka
kap.	kapitola

# 1 ÚVOD

Historie filtrace se do jisté míry odráží od historie lidských potřeb. V současné době je pro čistý vzduch nezbytné velké množství výrobních procesů a určitou součástí dnešního průmyslu je potřeba vyhnout se přímému vystavení nežádoucích částic nanesených vzduchem a to: použitím filtru, nebo častěji filtrační jednotkou. V lékařství a biologii je v dnešní době nutné spoléhat na sterilní ovzduší. Filtrace obecně zlepšuje čistotu ovzduší a je schopna ji zajistit v různých typech prostředí [1].

Nyní se ve světě používá velké množství druhů filtrů v různých aplikacích. Největší využití mají v průmyslových závodech zejména pro čištění vzduchu, filtrace v potravinářství (mléko, víno, apod.), dále pro přípravu sterilního vzduchu v bioprovozech, atd. Výroba se především rozvíjí s potřebou ochrany životního prostředí.

Celá řada světových odborníků a výzkumníků pracuje na vývoji mnoha nových aplikací pro nanovláknenné materiály, jaké si jen dokážeme představit. Nanovláknna, jež se velice často stávají jedinečnou součástí materiálů, jsou různými způsoby integrovány do konečných výrobků [18]. Uplatnění mohou najít v mnoha oborech, zejména ve zdravotnictví (filtry na chirurgické sály), biomedicině (roušky, krycí a obvazový materiál, atd.), automobilovém průmyslu (filtry ke spalovacím motorům).

Předmětem této diplomové práce je především prostudování problematiky filtrace vzdušnin se zaměřením na filtrační vlastnosti a metody jejich hodnocení, dále prostudování problematiky definic a určování strukturních parametrů vláknenného materiálu. Filtrační vlastnosti jsou v této práci velice důležité, stejně tak jako strukturní parametry vláknenného materiálu. Práce se zabývá otázkou, do jaké míry je možné na základě znalostí strukturních parametrů předvídat filtrační vlastnosti.

Při provádění experimentů bylo k dispozici 5 vzorků s nanosenou nanovláknennou vrstvou. Vrstvy všech vzorků jsou tvořeny papírovým podkladem z filtračního papíru s nanosenou polyamidovou (PA 6) nanovláknennou vrstvou, jež připravila společnost Elmarco s.r.o. v Liberci. Vrstvy se od sebe liší nejen filtračními vlastnostmi, ale i strukturními parametry.

Hlavním cílem experimentální části této práce bylo porovnání vztahů mezi strukturními parametry a filtračními vlastnostmi zjištěnými na základě experimentu a na základě výpočtu. Hlavní důraz byl kladen na určení vhodné materiálové konstanty pro výpočet velikosti pórů na základě znalosti ostatních parametrů.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

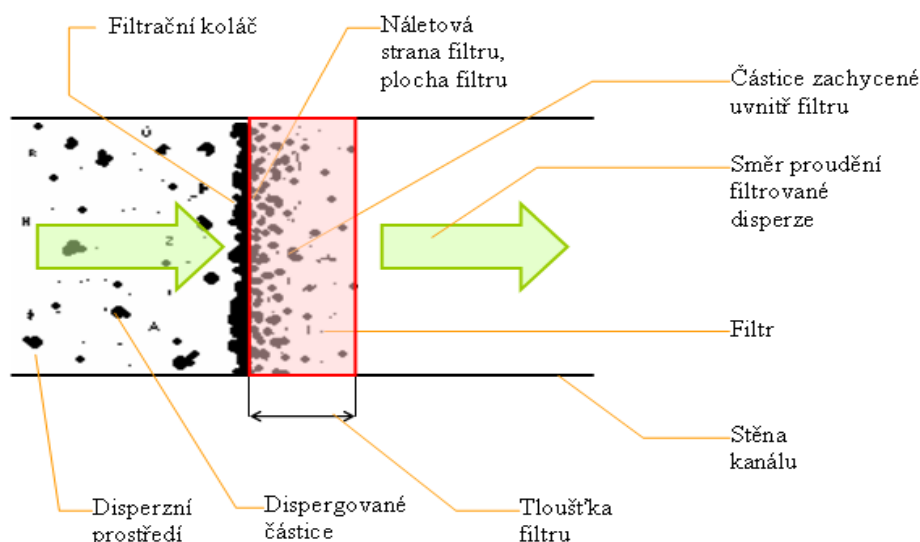
V teoretické části této diplomové práce se nejprve zaměříme na teorii filtrace, především na filtrační parametry, mechanismy, vlastnosti a také na povrchovou a hloubkovou filtraci. Dále probereme problematiku strukturních parametrů vlákenného materiálu. V poslední řadě se ve stručnosti podíváme do světa nanovláken, na jejich vlastnosti a výhody, výrobní technologie a použití.

### 2.1 Filtrace

#### 2.1.1 Definice filtrace a základní rozdělení

Filtrace je metoda dělení pevné látky od kapaliny či plynu na porézní přepážce, tzv. filtru. Jako filtr se nejčastěji v laboratorní chemii používá filtrační papír. Disperze filtrem protéká, zatímco pevné částice filtr zachycuje [2].

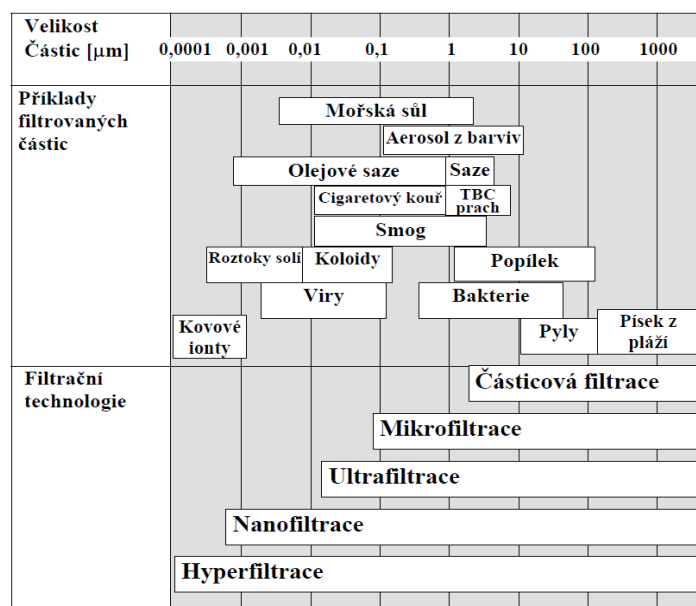
Filtrace vzdušnin je proces, ve kterém pomocí filtru oddělujeme částice rozptýlené v proudu vzduchu.



Obr. 1 Schéma procesu filtrace [3].

Na obr.1 je znázorněno obecné schéma procesu filtrace, kde dispergované částice jsou umístěny v disperzním prostředí, ze kterého některé z nich nalétávají na plochu filtru kde se zachytí a vytvoří vrstvu tzv. filtrační koláč a některé se zachytí uvnitř filtru. Filtrovaná disperze by měla být po průchodu filtrem zbavena dispergovaných částic.

Podle filtračních mechanismů rozeznáváme povrchovou a hloubkovou filtraci, na kterou se zaměříme více v kapitole 2.5.



Obr. 2 Filtrační technologie a jejich příklady filtrovaných částic, rozdělených dle jejich velikostí [4].

Parametry filtračného materiálu se dají z jeho mikroskopického a makroskopického hlediska třídit následně: plocha a tloušťka filtru, plošná a objemová hmotnost filtru, stejneměrnost materiálu, materiál a jeho parametry, parametry vláken a struktura filtru.

Do parametrů filtrovaných částic patří především velikost částic disperzního podílu, distribuce velikosti částic disperzního podílu, koncentrace částic, tvar a povrch částic, objemová hmotnost částice a elektrické vlastnosti.

K parametrům filtračního procesu patří zejména rychlost náletu částic na filtr, viskozita protékajícího média a nakonec teplota, tlak a vlhkost [3].

### 2.2.1 Parametry filtračního materiálu

#### a) Plocha a tloušťka filtru

Velikost filtrační plochy má výrazný vliv především na tlakový spád. Tloušťku filtru je možné aplikovat zvyšováním počtu vrstev, tedy zvyšováním plošné hmotnosti [3]. Vztah mezi filtrační plochou a tlakovým spádem je vyjádřen D'Arcyho rovnicí:

$$Q = \frac{A \cdot \Delta p \cdot k_p}{t} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1)$$

kde  $Q$  [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ] je tok vzduchu,  $A$  [ $\text{m}^2$ ] je plocha vrstvy kolmá ke směru toku,  $\Delta p$  [Pa] je rozdíl tlaku před a za vrstvou neboli tlakový spád,  $t$  [m] je tloušťka vrstvy a  $k_p$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ] je koeficient propustnosti vrstvy [8].

#### b) Plošná a objemová hmotnost filtru

Pojednává o velmi jednoduchém způsobu zvýšení filtrační účinnosti, který je provázen spolu s růstem tlakového spádu [3]. Vliv zvýšení zaplnění filtru na jeho tlakový spád je popsán mnoha autory [1]. Hodnota zaplnění je důležitá pro jednotlivé teorie filtrace.

#### c) Stejnomořnost materiálu

Hmotová stejnoměrnost výrazně ovlivňuje filtrační proces. Tvar proudění filtrovaného média je určován minimalizací odporové síly vzniklé protékáním viskózního média porézním prostředím. Z toho důvodu, v místě ve kterém je lokálně nižší zaplnění projde v čase větší množství částic, než v místě ve kterém je zaplnění lokálně vyšší [3].

#### d) Materiál a jeho parametry

Mezi důležité parametry materiálu můžeme zařadit povrchovou interakci s částicemi, elektrické vlastnosti, odolnost vůči negativním vlivům, mechanické charakteristiky apod. [3].

Částice jsou na povrchu vlákna drženy pomocí Van der Waalsových sil, elektrostatických sil, případně povrchového napětí [5].

Interakce mezi vlákenným materiálem a filtrovanou částicí určuje míru pevnosti zachycení a udržení částice, která se dostala do těsné blízkosti povrchu vlákna.

Elektrické vlastnosti filtračního materiálu jsou velice důležité, a to ze dvou důvodů. Prvním důvodem je možnost využít elektrostatického pole pro záchyt filtrovaných částic, a druhým důvodem je naopak možnost použití filtrů antistatických, které se používají v prostorách s nebezpečím požáru či výbuchu.

Vnější vlivy negativně ovlivňují vlákenný materiál filtru. Chemické vnější vlivy ovlivňují vlákenný materiál filtru např. působením kyselin, oxidačních činidel, atd. a fyzikální vnější vlivy ho mohou ovlivňovat především působením tepelné energie a zářením. Tyto negativní vlivy mohou vlákenný materiál zcela zničit, nebo může dojít k protržení filtru vlivem toku filtračního média [3].

#### e) Parametry vláken

Do parametrů vláken zahrnujeme zejména jejich průměr, tvar průřezu, apod. Průměr vláken i tvar průřezu určují velikost specifického povrchu vlákna, který se vyjadřuje v  $\text{m}^2/\text{g}$ . Při větším specifickém povrchu vlákna je větší pravděpodobnost interakce mezi vlákenným povrchem a zachytávanou částicí. Větší specifický povrch vláken ve filtru má za následek více turbulencí vzduchu obtékajícího vlákna, což také přispívá k větší efektivitě filtru [3].

#### f) Struktura filtru

Z hlediska struktury je důležitá zejména orientace vláken v prostoru, gradient hustoty, geometrická stabilita apod. Většina teoretických modelů vychází z představy válcového vlákna umístěného kolmo ke směru proudění filtrované disperze (viz. obr. 3).

Gradient hustoty filtru vyjadřuje lokální změnu jeho zaplnění, přičemž zaplnění je definováno jako podíl objemu vláken v prostoru tvořeném vlákny a vzduchem [3].

## 2.2.2 Parametry filtrovaných částic

#### a) Velikost částic disperzního podílu

Velikost zachytávaných částic je hlavním faktorem, který je schopen určit typ použitého filtru a parametry filtračního procesu. Brown [1] uvádí, z pohledu efektivity filtrace je velikost filtrovaných částic od 0,1 do 1  $\mu\text{m}$  nejkritičtější. Pro částice větší než 1  $\mu\text{m}$  platí,

že efektivita záchytu se zvyšuje s růstem velikosti částic. Pro částice menší než  $0,1\ \mu\text{m}$  se efektivita záchytu zvyšuje se zmenšováním zachytávaných částic. S postupně rostoucí rychlostí filtrace se minimum efektivy posunuje směrem k nižším hodnotám velikosti částic.

#### b) Distribuce velikosti částic disperzního podílu

Dá se říci, že většina teoretických modelů pro popis filtračního procesu a konstrukce filtrů počítá buď s filtrací monodisperzních částic, nebo částic s úzkou distribuční křivkou velikostí.

Částice se při průchodu vlákenným filtrem separují podle velikosti, což závisí na filtrační rychlosti. Nejprve se oddělují velké částice, respektive malé (viz. bod a), a tím dochází k zúžení distribuční křivky. V průmyslovém provozu se často filtruje pouze jeden typ velikostí částic (např. prach ve vápenkách) s úzkou distribuční křivkou [3].

#### c) Koncentrace částic

Čím je větší koncentrace částic ve vzduchu, tím se zvyšuje i míra růstu tlakového spádu a efektivy. Částice, jež zaplňují mezivláknenné prostory, jsou schopny výrazně měnit filtrační vlastnosti. Koncentrace částic určuje životnosti filtru [3].

#### d) Tvar a povrch částic

Částice je možné podle tvaru třídit na izometrické (tvar aproximovatelný koulí), destičkovité a vláknité [6]. Teoretické modely filtrace obvykle aproximují tvar částice koulí, případně vláknem [1]. Ve vláknenné soustavě se budou snadněji zachytávat částice složitějšího tvaru, než částice kulovité. Tato skutečnost je dána lepší možností mechanického zaklesnutí a větším specifickým povrchem částic.

#### e) Objemová hmotnost částice

Tento přístup závisí především na filtračním mechanismu. Jestliže roste objemová hmotnost částice, roste také efektivita setrvačného a gravitačního usazení, efektivita přímého záchytu se však nemění a efektivita difuzního a elektrostatického záchytu klesá. Samotný filtrační proces není nikdy dán pouze jedním filtračním mechanismem. Míra důležitosti jednotlivých mechanismů závisí na konkrétních parametrech filtračního procesu. Důležitým faktorem je například rychlost filtrace. Jak lze odvodit z bodu a) kapitoly 2.2.3, při velkých filtračních rychlostech s růstem objemové hmotnosti částic roste i efektivita záchytu [3].



#### f) Elektrické vlastnosti

Pokud roste velikost elektrického náboje částic, roste i efektivita filtrace. Na základě Coulombova zákona lze odvodit přitažlivou sílu mezi nabitou částicí a nenabitým (resp. nabitým) vláknem [3]. Detailněji se touto problematikou zabývá například Pich [7].

### 2.2.3 Parametry procesu filtrace

#### a) Rychlost náletu částic na filtr

Filtrační rychlost má výrazný vliv na jednotlivé filtrační mechanismy. S rostoucí rychlostí toku média filtrem roste význam mechanismu setrvačného usazení, klesá význam mechanismu difuzního zachytu, elektrostatického zachytu a setrvačného usazení. Větší filtrační rychlost je vhodná pro velké částice s velkou měrnou hmotností, na rozdíl od malých částic (průměry řádově mikrometry a menší) u kterých jejich efektivita zachytu se zvyšující se filtrační rychlostí klesá. Vztah mezi rychlostí filtrace a tlakovým spádem je určen lineárně pomocí D'Arcyho rovnice [3].

#### b) Viskozita protékajícího média

Při filtraci vzduchu nemá viskozita protékajícího média takový význam, jako u kapalinové filtrace. Pokud roste viskozita vzduchu, roste i tlakový spád filtru a zhoršuje se jeho odlučivost. Tlakový spád je viskozitě úměrný, přičemž viskozita roste s teplotou [3].

#### c) Teplota, tlak a vlhkost

Teplota prostředí působí na filtrační proces z několika hledisek:

Prvním hlediskem je použitelnost filtračního materiálu vzhledem k jeho odolnosti vůči teplu, záření a působení chemikálií. Druhé hledisko je takové, že se změnou teploty se mění viskozita prostředí a tím i tlakový spád a efektivita. Za třetí teplota ovlivňuje mechanismus zachytu difuzí.

Z hlediska odolnosti filtračního materiálu vůči prostředí je velice důležitá vlhkost prostředí, která ovlivňuje stabilitu náboje na povrchu vláken.

Tlak vzdušného prostředí před filtrem bývá většinou roven velikosti atmosférického tlaku, ke kterému nutně v určitých případech připočítat hodnotu tlakového spádu filtru [3].

## 2.3 Filtrační mechanismy

Dané mechanismy představují takový model, jakým se částice přibližuje k povrchu vlákna. Platí předpoklad, že po kontaktu s vláknem je částice zachycena pomocí Van der Waalsových sil, elektrostatických sil a sil vyvolaných povrchovým napětím. Filtrační mechanismy popisují např. Brown [1] a Pich [7].

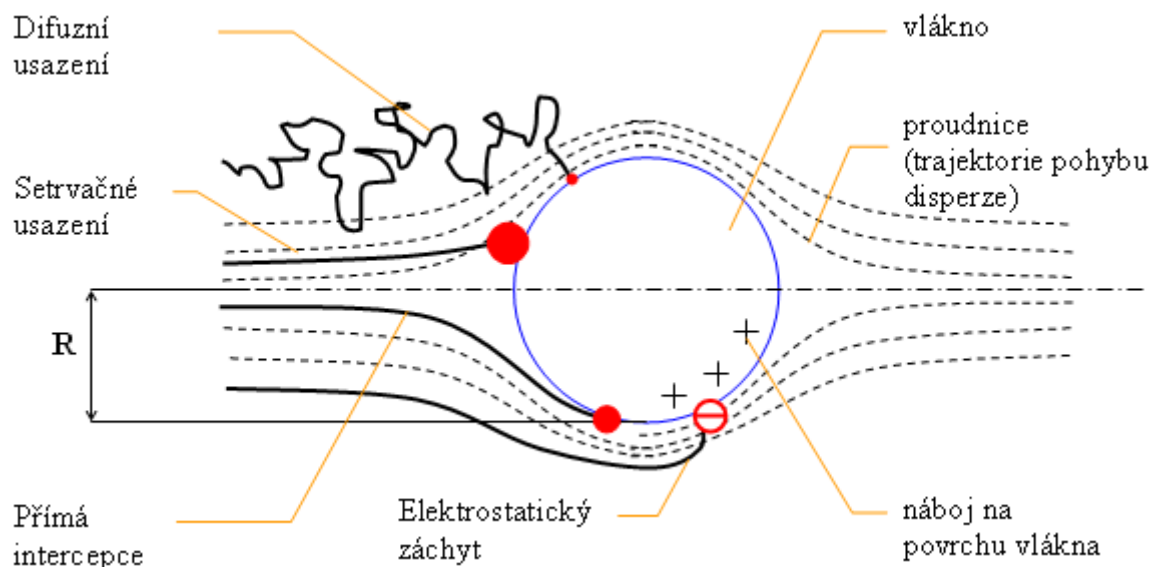
Mezi filtrační mechanismy patří přímý záchyt, setrvačné usazení, difúzní usazení a elektrostatické usazení. Na obr. 3. je znázorněno schématické vyjádření filtračních mechanismů hloubkového filtrování, kde vlákno je orientované kolmo ke směru pohybu filtrované disperze a zaujímá tvar válce.

Mechanismus přímého záchytu využívá takové představy, kdy částice se shodně pohybují s tokem disperzního prostředí. Částice je zachycena v takovém momentě, kdy se přiblíží k povrchu vlákna na takovou vzdálenost, která je rovna jejímu poloměru.

Při setrvačném usazení nesledují částice vyznačující se velkou rychlostí a hmotností zakřivení proudnic a narážejí na povrch vláken, podobně jako projektily.

Mechanismus difúzního usazení obsahuje malé částice které nesledují zakřivení proudnic a difundují k povrchu vláken, v důsledku Brownova pohybu. Pokud rychlost proudění filtrované disperze klesá, pak roste význam difúzního usazení.

Při elektrostatickém usazení dochází v důsledku působení přitažlivých sil daných nábojem na povrchu vlákna a zachytávané částice, směrem k vláknu je trajektorie pohybu částice zakřivena [3].



Obr. 3 Schéma filtračních mechanismů [3].

Celková efektivita neboli účinnost filtrace je dána vztahem:

$$E_c = E_c \{E_r(N_r), E_i(Stk), E_d(Pe), E_e(Nq)\} \quad [\%] \quad (2)$$

kde  $E_c$  [%] je celková efektivita filtrace,  $E_r$  [%] je efektivita mechanismu přímého zachytu dána parametrem  $N_r$ ,  $E_i$  [%] je efektivita setrvačného usazení dána Stokes číslem  $Stk$ ,  $E_d$  [%] je efektivita mechanismu difuzního usazení dána Peclet číslem  $Pe$ ,  $E_e$  [%] je efektivita elektrostatického usazení dána parametrem  $Nq$  [13].

## 2.4 Filtrační vlastnosti

Vlastností textilních filtrů je více a uvádějí se podle toho, do jaké míry potřeby je nutné je použít. Vlastnosti se v průběhu filtračního procesu mění v důsledku zaplňování mezivlákných prostor částicemi. Tento jev se nazývá kinetika filtrace a je důležitým faktorem filtračního procesu. Mezi hlavní filtrační vlastnosti patří především efektivita neboli odlučivost, tlakový spád, životnost filtru, odolnost vůči vnějším vlivům a další vlastnosti související s filtrací, mezi které je nutné zařadit prodyšnost, pórovitost a odolnost vůči bakteriím [3].

### 2.4.1 Efektivita

Efektivita, neboli odlučivost je daná vztahem:

$$E = \left(1 - \frac{G_1}{G_2}\right) \cdot 100 \quad (\%) \quad (3)$$

kde  $G_1$  je množství disperzního podílu za filtrem [g],  $G_2$  celkové množství disperzního podílu [g] a podíl  $G_1/G_2$  je značen jako průnik  $P$ . V některých případech se efektivita zjišťuje nepřímou.

Hodnota efektivity se mění v důsledku změny struktury filtru v průběhu filtračního procesu, tento fakt je důležitý pro hodnocení filtru. Je to dáno tím, že částice zachycené na povrchu vlákna se samy stávají filtrem a zvyšují tak jeho činnou plochu [3]. Jak uvádí Brown [1], při malých rychlostech lze změnu efektivity jednoho vlákna vyjádřit pomocí vztahu:

$$E_s(m) = E_s(0) \cdot (1 + (\lambda \cdot m)) \quad (4)$$

kde  $E_s(0)$  je efektivita jednoho vlákna,  $m$  je hmotnost nanesených částic vztažená na objem filtračního materiálu a  $\lambda$  je konstanta daná parametry filtrace, filtru a filtrovaných částic. Tento lineární vztah ale neodpovídá chování reálného filtru, kde efektivita roste rychleji při malých hodnotách  $m$  a pomaleji při vyšších hodnotách  $m$ . Hodnoty efektivity jsou po určité době buď konstantní, nebo začnou kolísat. Z toho důvodu je u reálných filtrů měřena buď počáteční efektivita, nebo se hodnoty efektivity měří opakovaně až do okamžiku, kdy filtr dosáhne zadaného tlakového spádu. Z takto získaných hodnot se střední hodnota vypočítá podle normy EN 779 [9] váženým průměrem podle vztahu:

$$E_{str} = \frac{1}{w} \cdot \left( \frac{w_2 \cdot (E_1 + E_2)}{2} + \frac{w_3 \cdot (E_2 + E_3)}{2} + \dots + \frac{w_n \cdot (E_{n-1} + E_n)}{2} \right) \quad (5)$$

kde  $E_{str}$  je střední hodnota efektivity,  $w_n$  je  $n$ -tá hodnota množství podaného prachu,  $E_n$  je  $n$ -tá hodnota efektivity a  $w$  je celkové množství podaného prachu dané součtem  $w_2$  až  $w_n$ . Index  $n$  značí pořadí opakovaného měření jednoho filtru.

## 2.4.2 Tlakový spád

Tlakový spád, jež bývá někdy označován jako tlaková ztráta, určuje rovnice:

$$\Delta p = p_1 - p_2 \quad [\text{Pa}] \quad (6)$$

kde  $p_1$  a  $p_2$  jsou tlaky filtrovaného média před a za filtrem, vyjádřené v pascálech. Vyjadřuje odpor vůči toku vzduchu skrz filtr. Pro seriózní hodnocení tlakového spádu je nutné uvést i rychlost toku vzduchu těsně před filtrem, neboť s jejím růstem roste i tlakový spád (většinou lineárně). Také hodnota tlakového spádu se v průběhu procesu filtrace mění v důsledku zaplňování mezivlákných prostor zachycenými částicemi. Při hodnocení reálného filtru se uvádí pouze počáteční tlakový spád, kdy filtr ještě neobsahuje zachycené částice [3].

### 2.4.3 Životnost filtru

Životnost filtru je daná dobou, kdy je třeba filtr vyměnit. Z hlediska životnosti známe filtry jednorázové a filtry s čištěním. Pro jednorázové filtry je životnost ovlivněna koncentrací částic ve vzduchu a množstvím částic, které je schopen pojmout do chvíle, kdy je tlaková ztráta příliš vysoká. Norma EN 779 [9] definuje životnost pomocí jímavosti:

$$J = E_{\text{stř}} \cdot m \quad [\text{g}] \quad (7)$$

kde  $J$  je jímavost filtru [g],  $E_{\text{stř}}$  je střední hodnota efektivity [%] a  $m$  je množství prachu naneseného na filtr [g] do okamžiku překročení mezního tlakového spádu. Pro některé filtry však může být reálná životnost výrazně nižší v důsledku kinetiky filtrace. Pro filtry s čištěním je životnost dána délkou intervalu mezi čištěním a počtem čištění do okamžiku, kdy pevnost filtru neodpovídá požadavkům procesu filtrace [3].

### 2.4.4 Odolnost vůči vnějším vlivům

Na filtr obecně působí chemické, mechanické, teplotní vlivy a kombinace těchto uvedených vlivů.

U některých aplikací je odolnost vůči vnějším vlivům důležitá stejně, tak jako hodnoty efektivity a tlakového spádu. Klasickým příkladem jsou hadicové filtry v teplárnách a ve vápenkách [3].

### 2.4.5 Další vlastnosti související s filtrací

Mezi vlastnosti, jež souvisí s kvalitou filtrů a jsou často udávány při specifikaci vláknenných filtrů, patří především prodyšnost, pórovitost, odolnost vůči bakteriím.

Prodyšnost vyjadřuje množství tekutiny, které projde skrz  $1\text{m}^2$  filtru za 1 minutu při definovaném tlakovém spádu, nejčastěji při 196 Pa. Udávané jednotky jsou  $\text{l/m}^2/\text{min}$  [3].

Pórovitostí lze vyjádřit velikost póru určenou obvykle střední, či maximální hodnotou, nebo distribucí velikostí. Nevýhodou hodnocení pórovitosti je problematická definice póru. Pro uspořádané vláknenné systémy s velkým zaplněním lze póry aproximovat válcovými kanály a celý vláknenný systém popsat pomocí Poiseuilleova zákona. Póry si lze představit

jako „vzduchová vlákna“. Pro výpočty velikostí pórů se zavádí různé předpoklady (viz. kap. 2.6), např. dle toho, zda nezávisle na zaplnění textilního vlákenného úvaru mají póry stále stejný tvar nebo stále stejnou délku [10].

Bakterie, jež jsou zachyceny filtrem, jsou stále aktivní a mohou časem prorůstat strukturou filtru a náhle se mohou uvolnit do čištěného prostoru. Při filtraci bakterií je nutné tedy řešit nejen jejich záchyt, ale i schopnost filtru je zničit, případně zastavit jejich růst [11].

Filtrační vlastnosti se dají zlepšovat různými způsoby. Mezi některé z nich patří např. zvýšení hustoty filtru, zvětšení tloušťky filtru neboli zvýšení plošné hmotnosti, změna orientace vláken, použití skládaných nebo elektrostaticky nabíjených filtrů, změna tvarů, případně průměrů vláken využitím nanovláken [12].

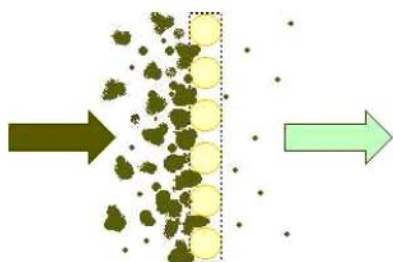
## **2.5 Povrchová a hloubková filtrace**

Nejprve přicházejí vláknité filtry, jejichž metoda filtrace je založena na principu síta. Přestože filtry a síta mají stejný základní účel, jejich funkce je různá. Síto je 100% účinné v zachycení částecek, které jsou větší než proděravění síta a zachycené objekty budou v kontaktu se značnou částí struktury síta. Velikost proděravění síta je kritická na rozdíl od jeho tloušťky. Není pravidlem, že dvě stejná sériově zapojená síta budou mít větší účinek než jedno stejné síto. Na druhé straně, silné vláknité filtry jsou účinnější než jeden tenký, ale žádný vláknitý filtr však není 100% účinný. V případě kdy se částice zachytí na povrchu filtru, na kterém vytvoří vrstvu tzv. filtrační koláč, jedná se o povrchové filtrování (viz. obr. 4).

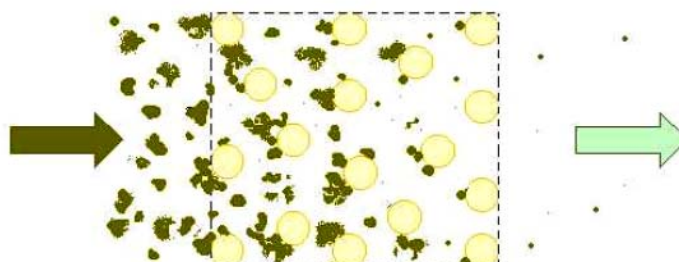
Filtr si můžeme představit jako velké množství vrstev navzájem rozptýlených vláken. I když jednotlivá vrstva vláken má velmi nízkou efektivitu, filtr svou funkci vykonává v celku dobře. Například jestliže je filtr vytvořen z jednoho sta vlákenné vrstvy, z nichž každá zachytí pouze 5% nahodilých částecek, filtr celkově zachytí 99,4%. Tento proces, kdy se částice nezachytí již na povrchu filtru, ale až na některé z dalších vrstev, se nazývá hloubkové filtrování ve vláknitých filtrech (viz. obr. 5) [1]. Do vlákenné struktury pronikají částice, které jsou mnohem menší než je vzdálenost mezi vlákny. Filtrované částice jsou chyceny v rámci filtračních mechanismů [13].

Vláknité filtry jsou vysoce propustné vzduchu a mají nízkou odolnost vůči proudění vzduchu, vzhledem k jejich otevřené struktuře. Vláknité filtry se nedají vyčistit, jejich odpor je nízký.

Hloubkové filtry jsou schopny zachytit malé částčky, které procházejí filtrem a zachytí se v něm [1].



Obr. 4 Povrchová filtrace [4]



Obr. 5 Hloubková filtrace [4]

### 2.5.1 Vybrané druhy filtrů

Nehledě na vláknité filtry, existují také zrnité filtry, membránové filtry.

Netkané vláknité filtry jsou efektivním prostředkem, který zachycuje jemné pevné nebo kapalně částice z toku plynu. Kvalita filtru závisí především na jeho účinnosti filtrace a poklesu tlaku. Pro zlepšení kvality filtru můžeme buď zvýšit účinnost filtrace nebo redukovat pokles tlaku, aniž bychom prováděli další změny [14].

Zrnité filtry, obsahující izometrické částčky, se používají k hloubkovému filtrování.

Membránové filtry jsou vyrobené z děrovaného nebo vysoce kompaktního vláknitého materiálu, obvykle jen několik málo mikrometrů silného. Tyto filtry je vhodné použít k povrchovému filtrování [1].

### 2.5.2 Struktura filtrů

Struktura filtrů je možná více podstatná než vlastnosti filtrů. Strukturu zrnitých filtrů lze popsat mnohem snadněji než strukturu filtrů vláknitých, protože základní jednotky jsou relativně izometrické. Ve krystalografii se můžeme setkat s tím, že zrníčka jsou hustě uspořádána do tvaru krychle nebo hexagonálně a vyplývající struktura je porézní.

Vláknité filtry mají velice otevřenou strukturu, která je důležitá v zajištění efektivní hloubky filtrování s nízkým odporem proudění vzduchu. Filtry se mohou jakkoli rozdělit na strukturální

typy podle jejich metod výroby a to na papírové filtry, mykané filtry, pórovité pěny a modelové filtry [1].

## 2.6 Strukturní parametry vlákenného materiálu

Abychom mohli vlákenný materiál vyhodnotit, je nutné znát některé jeho strukturní parametry. Mezi takové strukturní parametry patří zaplnění, průměr vlákna, poróznost, jemnost vlákna, velikost póru atd.

### Zaplnění

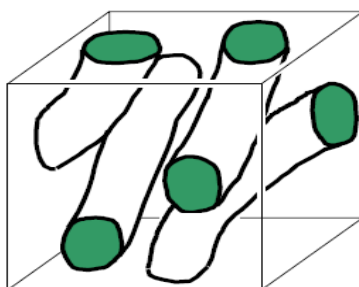
Zaplnění  $\mu$  je definováno jako podíl objemu vláken ku celkovému objemu vlákenného útvaru,  $\mu \in (0;1)$ , lze ho také interpretovat též jako podíl plochy vláken v příčném řezu příze ku celkové ploše příčného řezu [15].

Objemová definice zaplnění je dána výrazem:

$$\mu = \frac{V}{V_c} \quad [-] \quad (8)$$

kde  $\mu$  je zaplnění [-],  $V$  je objem vláken [ $\text{m}^3$ ],  $V_c$  je celkový objem vlákenného útvaru [ $\text{m}^3$ ].

Na obr. 6. je znázorněna část textilního vlákenného útvaru ve tvaru hranolu s celkovým objemem  $V_c$ . Uvnitř tohoto tělesa jsou úseky vláken s úhrnným objemem vláken  $V$  a platí  $V \leq V_c$ . Rozdíl  $V_c - V$  vyjadřuje objem vzduchu mezi vlákny [15].



Obr. 6 Textilní vlákenný útvar ve tvaru hranolu s vlákny [16].



Plošná interpretace zaplnění, která plyne z rovnice (8) a je dána vztahem:

$$\mu = \frac{V}{V_c} = \frac{S}{S_c} \quad [-] \quad (9)$$

kde  $S$  je souhrnná plocha řezů vláken [ $\text{m}^2$ ] a  $S_c$  je celková řezná plocha vlákněným útvarem [ $\text{m}^2$ ] [10].

Zaplnění se dá také vyjádřit jako podíl měrné hmotnosti vláken (hustoty)  $\rho_{vl}$  ku měrné hmotnosti vlákněného materiálu  $\rho$  (za předpokladu zanedbání hmotnosti vzduchu).

Hmotnostní interpretace zaplnění je dána vztahem:

$$\mu = \frac{\rho_{vl}}{\rho} \quad [-] \quad (10)$$

kde  $\mu$  je zaplnění [-],  $\rho_{vl}$  je měrná hmotnost vláken [ $\text{kg.m}^{-3}$ ] a  $\rho$  je měrná hmotnost vlákněného materiálu [ $\text{kg.m}^{-3}$ ] [15].

### **Průměr vlákna**

Pokud by vlákno mělo kruhový průřez s průměrem vlákna  $d$ , platil by vztah:

$$s = \frac{\pi d^2}{4} \quad [\text{m}^2] \quad (11)$$

z něhož lze vyjádřit průměr vlákna  $d$ :

$$d = \sqrt{\frac{4s}{\pi}} \quad [\text{m}] \quad (12)$$

kde  $d$  je průměr vlákna [ $\text{m}$ ] a  $s$  je kruhový průřez vlákna [ $\text{m}^2$ ].

Veličina  $d$  však může být vypočtena z rovnice (12) i pro vlákno s nekruhovým průřezem. Potom ji nazýváme ekvivalentním průměrem vlákna [10].

## Porózita

Porózita neboli porezita vyjadřuje podíl objemu vlákenného útvaru vyplněného vzduchem. Vlákenný útvar má celkový objem  $V_c$ , vlákna v něm mají objem  $V$ . Objem vzduchu (přesněji objem mezivláknenných prostorů) je  $V_c - V$  [10].

Porózita je pak definovaná vztahem:

$$\psi = \frac{V_c - V}{V} = 1 - \frac{V}{V_c} = 1 - \mu \quad [-] \quad (13)$$

## Jemnost vlákna

Jemnost vlákna se vyjadřuje délkovou hmotností vlákna, tzn. podílem hmotnosti vlákna ku délce vlákna. Jemnost vlákna je dána vztahem:

$$T = \frac{m}{l} \quad [\text{tex}] \quad (14)$$

kde  $T$  je jemnost vlákna [tex],  $m$  je hmotnost vlákna [g] a  $l$  je délka vlákna [km].

Jemnost vlákna lze také vyjádřit měrnou hmotností vlákna, tzn. součinem plochy příčného řezu vlákna a měrnou hmotností vlákna. Pak platí vztah:

$$T = s\rho \quad [\text{tex}] \quad (15)$$

kde  $T$  je jemnost vlákna [tex],  $s$  je plocha příčného řezu vlákna [ $\text{m}^2$ ] a  $\rho$  je měrná hmotnost vlákenného materiálu [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ] [16].

## Tvar příčného řezu vláken

Jestliže je průřez vlákna kruhový, platil by vztah  $p/(\pi d) = 1$ . Ve všech ostatních případech je hodnota výrazu  $p/(\pi d) > 1$ . Proto K. Malinowská definovala tvarový faktor průřezu výrazem:

$$q = \frac{p}{\pi d} - 1 \quad [-] \quad (16)$$

Z tohoto vztahu lze odvodit výraz pro výpočet obvodu příčného řezu vlákna:

$$p = \pi d(1 + q) \quad [\text{m}] \quad (17)$$

kde  $q$  je tvarový faktor průřezu vlákna [-],  $p$  je obvod vlákna [m] a  $d$  je průměr vlákna [m].

V následující tabulce jsou uvedeny nejběžnější hodnoty tvarového faktoru  $q$  dle K. Malinowské [10].

Tvar příčného řezu vláken	Tvarový faktor $q$
"kruhový"	0 – 0,07
"trojúhelníkový"	0,09 – 0,12 (ideálně 0,29)
bavlna střední zralosti	0,45 – 0,50
nepravidelný pilovity	0,50 – 0,60

*Tab. 1 Hodnoty tvarového faktoru  $q$  [10].*

Tvar mezivláknenných pórů je ve skutečnosti velice složitý. Z důvodu snadnějšího řešení zavedeme modelový předpoklad, kdy mezivláknenné póry mají tvar kapilár (kapiláry mohou mít i jiný průřez než kruhový, přesto je zavedený předpoklad výrazným zjednodušením skutečnosti). Póry si lze také představit jako „vzduchová vlákna“, jejichž definované veličiny jsou podobné jako u vláken. V analogii bude použito následující značení:

$L_p$  – délka pórovitých kapilár ve vláknenném útvaru [m],

$d_p$  – ekvivalentní průměr póru [m],

$q_p$  – tvarový faktor póru [-] [10].

Obvod příčného řezu pórem lze v analogii vyjádřit k (17) rovnicí:

$$p_p = \pi d_p(1 + q_p) \quad [\text{m}] \quad (18)$$

Objem pórů je dán vztahem:

$$V_p = \frac{\pi d_p^2}{4} L_p \quad [\text{m}^3] \quad (19)$$

Ekvivalentní průměr póru je určen vztahem:

$$d_p = \frac{1 + q_p}{1 + q} \frac{1 - \mu}{\mu} d \quad [\text{m}] \quad [10] \quad (20)$$

V případě konvenčního póru, neznáme –li pravidlo pro tvarový faktor póru  $q_p$ , zavádíme konvenci kdy tvarový faktor póru  $q_p$  je roven nule. Konvenční pór lze chápat jako pór “válcového tvaru” [16].

Póry mají stále stejný tvar nezávisle na zaplnění textilního vlákenného útvaru, zavádíme **zjednodušující tvarový předpoklad – variantu I**. Pro tvarový faktor póru  $q_p$  pak platí  $q_p = \text{konstantní}$ , tvarový faktor vlákna  $q = \text{konstantní}$ , tudíž platí vztah:

$$\frac{1+q_p}{1+q} = k \quad (21)$$

kde  $k [-]$  je vhodná konstanta neboli předpoklad.

Z rovnice (20) plyne vztah pro ekvivalentní průměr póru:

$$d_p = k \frac{1-\mu}{\mu} d \quad [\text{m}] \quad (22)$$

Délka pórovitých kapilár je dána vztahem:

$$L_p = \frac{L}{k^2} \frac{\mu}{1-\mu} \quad [\text{m}] \quad (23)$$

Na zaplnění závisí nejen průměr póru, ale také délka pórů. Obecně platí, čím je zaplnění větší, tím je menší průměr póru a tím je větší délka pórovitých kapilár [10].

Zvláštním případem varianty I. je idea válcových pórů, ve které je tvarový faktor pórů  $q_p$  roven hodnotě 0. Pak platí tyto vztahy:

$$\frac{1}{1+q} = k \quad (24)$$

$$d_p = \frac{1}{1+q} \frac{1-\mu}{\mu} d \quad (25)$$

**Tvarový předpoklad - varianta II.** udává, že póry nezávisle na zaplnění textilního vlákenného úvaru mají stále stejnou délku. Je to dáno tím, že úhrnná délka vláken ve vlákenném útvaru je konstantní.

Pro tvarový faktor pórů platí vztah:

$$1 + q_p = k \sqrt{\frac{\mu}{1 - \mu}} \quad (26)$$

Dle tohoto vztahu tvarový faktor póru roste s rostoucím zaplněním. Tvarově členitější jsou póry jemné, než póry velké [10].

Z rovnic (20) a (26) lze vyjádřit ekvivalentní průměr póru následně:

$$d_p = \frac{k}{1 + q} \sqrt{\frac{1 - \mu}{\mu}} d \quad (27)$$

**Empiricky zobecněná varianta III.** udává předpoklad ekvivalentního průměru póru daného následným vztahem:

$$d_p = \frac{k}{1 + q} \left( \frac{1 - \mu}{\mu} \right)^a d \quad (28)$$

Z tohoto vztahu pro tvarový faktor pórů platí vztah:

$$1 + q_p = k \left( \frac{1 - \mu}{\mu} \right)^{a-1} \quad (29)$$

kde  $k$  [-],  $a$  [-] jsou vhodné parametry [16].

V případě konvenčního póru lze tok tekutiny porózním vlákným svazkem určit pomocí vztahu **Carman – Kozeny**:

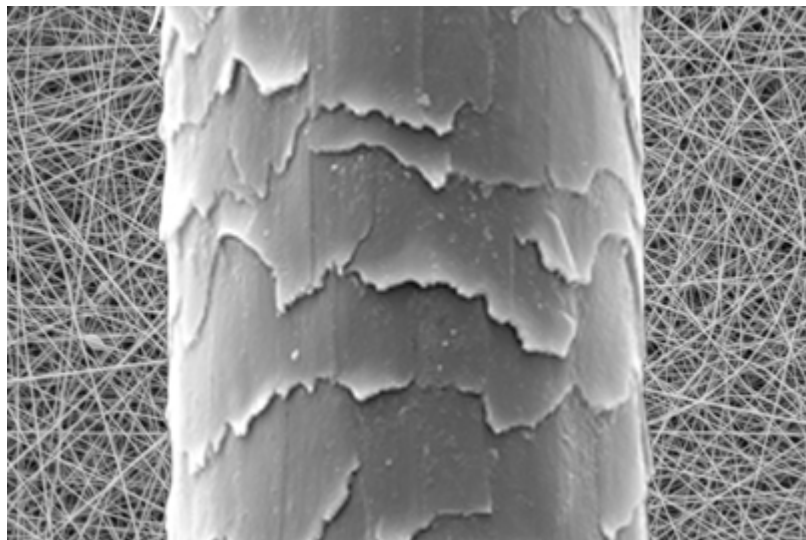
$$Q = \frac{k^2}{2\gamma_{vl}^2 \eta} \frac{S_c \Delta p}{H} \frac{(1-\mu)^3}{\mu^2} \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (30)$$

kde  $Q$  je průtok vzduchu vlákným svazkem [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ],  $k$  je vhodný parametr [-],  $\gamma_{vl}$  je objemový povrch vláken [ $m^{-1}$ ],  $\eta$  je viskozita vzduchu [ $Pa \cdot s$ ],  $S_c$  je celková průřezová plocha [ $m^2$ ],  $\Delta p$  je tlakový spád [ $Pa$ ],  $H$  je délka porózního materiálu [ $m$ ] a  $\mu$  je zaplnění [-] [16].

## 2.7 Nanovláknna

Jedná se o vlákna s průměrem menším než 1 mikrometr = 1000 nanometrů [21], vlákna která jsou tisíckrát tenčí než lidský vlas. Vzhledem k jejich malé velikosti se dají pozorovat a fotografovat pouze pod elektronovým mikroskopem [17].

Lidský vlas má průměr okolo 80 mikrometrů, je tedy přibližně 200krát větší než průměrné nanovláknno (viz. obr. 7) [18]. Nanovláknna bývají v mnohé literatuře označovány za materiály třetího tisíciletí [21].



Obr. 7 Velikost lidského vlasu v porovnání s nanovláknennou vrstvou [18].

### 2.7.1 Vlastnosti a použití nanovláken

Nanovlákná připravená metodou electrospinning se vyznačují následujícími vlastnostmi:

- Velký specifický měrný povrch
- Vysoká pórovitost a malé velikosti pórů
- Průměry vláken: 50 – 500 nm
- Plošná hmotnost: 0,1 – 10 g/m<sup>2</sup>
- Transparentnost – průměry nanovláken jsou výrazně menší než vlnová délka světla, což činí nanovlákná neviditelná pod optickým mikroskopem
- Malá pevnost vzhledem k nízké hmotnosti a jejich mechanická odolnost je dána použitým textilním podkladem a adhezí k němu

Nanovlákná se dají používat jako filtrační prostředky, také se s nimi můžeme setkat v biomedicíně, kosmetice, v elektronice, v automobilovém průmyslu atd.

Filtry s nanovlákný je výhodné používat z několika hledisek. Nanovláknenný materiál má velký měrný povrch při nízké hmotnosti, malé průměry vláken a je vysoce porézní. Velikost pórů v řádu několika nanometrů, což zabezpečuje neprůchodnost mikročástic či mikroorganismů, dokonce i virů. Malé průměry vláken zajišťují vysokou filtrační účinnost, ale současně je dosahováno i nízkého tlakového spádu. Nízká váha koresponduje s úspornou výrobou díky materiálovým úsporám. Uplatnění mohou najít ve farmacii, chemickém průmyslu, automobilovém průmyslu (filtry ke spalovacím motorům), elektrotechnickém průmyslu, zdravotnictví (filtry na chirurgické sály apod.), kosmetice atd. [20].

Struktura nanovláknenné textilie je podobná struktuře mezibuněčné hmoty lidské tkáně, což umožňuje jejich široké využití v biomedicíně:

- a) Jako krycí a obvazový materiál - textilie z nanovláken mohou být použity ke krytí ran, kde zajišťují průnik kyslíku, odtok exsudátu a současně brání bakteriím ve vstupu do rány. Zároveň na ně mohou být navázány některé podpůrné látky, jako jsou antimikrobiální a hemostatické léčiva nebo léčiva urychlující hojení.
- b) Ve tkáňovém inženýrství – nanovlákná mohou být potenciálně využita ve tkáňovém inženýrství pro rekonstrukce kůže, kostí, cév, svalů i nervové tkáně, kde slouží jako nosiče buněk.
- c) Ve filtračních systémech – separační membrány s definovatelnými vlastnostmi, inteligentní filtry s antibakteriálními účinky nebo s navázanými protilátkami.

- d) Roušky – do textilií, které mají sloužit jako obličejové roušky, zatím odborníci zkoušejí přidávat stříbro, které má silné antivirové účinky. U super filtračních materiálů, např. pro vzduchové filtry na operačních sálech, se stříbro využívá už nyní [20].

V kosmetice mohou vzniknout nové výrobky pro pokročilou komplexní péči, jako jsou např. výrobky s čistícími nebo hojivými účinky. Současná péče o pleť zahrnuje také umývací prostředky kapesníčky nebo utěrky. Elektrostaticky zvlákněná polymerní nanovlákná již byla vyzkoušena jako kosmetická pleťová maska pro hojení pleti, její čištění nebo pro léčebné účely [20].

Některé skupiny materiálu nabízejí jemný povrch a vysokou propustnost vzduchu, což jsou vlastnosti zvláště požadované v hygienických výrobcích. Nanovlákná mohou být hydrofobně nebo hydrofilně upravena pro nejrůznější účely.

Na bázi stejného polymeru může vzniknout hydrofobní materiál, avšak při zvláknění technologií Nanospider se stává nanovláknenná textilie hydrofilní. Hydrofilně upravená nanovlákná mohou být použita v mnoha absorpčních výrobcích, jako jsou např. plenky, ubrousky, utěrky apod. [20].

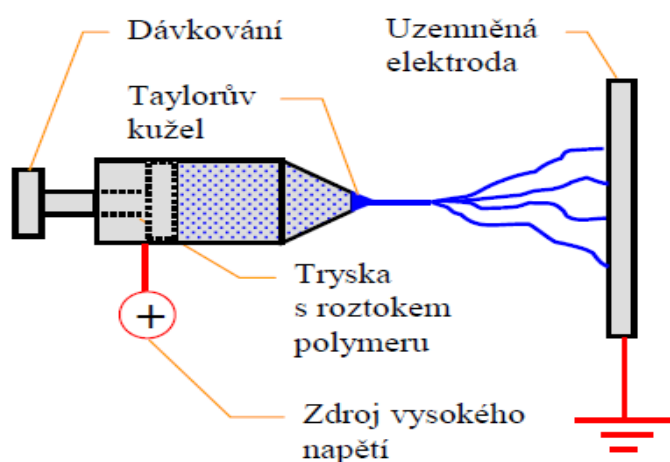
## **2.7.2 Technologie výroby**

K nejpoužívanějším způsobům výroby nanovláken patří elektrostatické zvláknování neboli elektrospinning (viz. obr. 8). Princip je založen na tvorbě kapiláry z kapky polymeru procházejícího tryskou do elektrického pole s napětím až 50 kV. Hotová nanovlákná s průměrem pod 500 nm se neuspořádaně ukládají na kolektor, který se pohybuje po povrchu elektrody [21].

Pokusná zařízení pracující na popsaném principu mohou za hodinu zhotovit 0,1 – 1 gram vláken. Nevýhodou elektrostatického zvláknování je fakt, že se při výrobě nanovláken nedá ovlivňovat stejnoměrnost tloušťky vlákna, počet a velikost kapek vycházejících z trysky jsou závislé na koncentraci a viskozitě polymeru atd. [21].

Vedle elektrostatického zvláknování existuje několik jiných výrobních technologií, jako je např. předení průtahem, zvláknování fázovým dělením tzv. samosběrem, podložková syntéza atd. Všechny tyto metody jsou velmi málo produktivní a mají více kvalitativních nedostatků než elektrostatické zvláknování, proto není třeba se v této práci o nich více zmiňovat [21].





Obr. 8 Princip zvlákňování pomocí metody elektrospinning [19].

Obr. 8 popisuje princip elektrostatického zvlákňování, kde roztok polymeru je dávkovacím zařízením vytlačen z trysky, která je zároveň jednou z elektrod elektrostatického pole. Působením elektrostatického pole dochází k vytažení vláknenného útvaru směrem k opačné elektrodě a následnému rozštěpení na jemná vlákna, jejichž měrný povrch je tak velký, že ještě před dopadem na opačnou elektrodu jsou vlákna vysušena [19].

Vzhledem k malé výrobnosti elektrostatického zvlákňovacího zařízení a hmotové nestejnóměrnosti vzniklé vrstvy, byla na Technické univerzitě v Liberci, katedře netkaných textilií vyvinuta metoda Nanospider v různých variantách [19].

Tento vynález je založen na jiném principu než jsou trysky a kapiláry a k výrobě se používají nejen vodorozpustné síťovatelné polymery. Zařízení pracuje s výkonem 1-5 g/min na 1 metr pracovní šířky. V roce 2005 začala úspěšně liberecká firma Elmarco s výrobou a prodejem těchto zařízení [21].

Technologie Nanospider (viz. obr. 9) je unikátní patentovanou technologií zvlákňování z volné hladiny roztoku polymeru v silném elektrostatickém poli bez použití trysek. Tato technologie se zakládá na zajímavém objevu, kdy je možné zvlákňovat nejen za pomoci kapiláry z kapky polymeru procházejícího tryskou do elektrického pole, ale z celé tenké vrstvy roztoku polymeru. Také umožňuje výrobu nanovláken z vodou rozpustných polymerů, z polymerů ředitelných rozpouštědly, jako jsou kyseliny či bipolární roztoky či z meltů (tavenin polymerů) a jsou vhodné pro výrobu organických a anorganických vláken [18]. Dále je velmi mnohostranná a splňuje všechny požadavky, jako je snadná přizpůsobitelnost výrobních parametrů a flexibilita nastavení dle individuálních představ výroby nanovláken.

Technologie Nanospider umožnila společnosti Elmarco vybudovat tak výkonná zařízení, že jsou schopna produkovat nanovláknenný materiál v průmyslovém měřítku a to bez použití jakýchkoliv zvlákňovacích trysek [18].

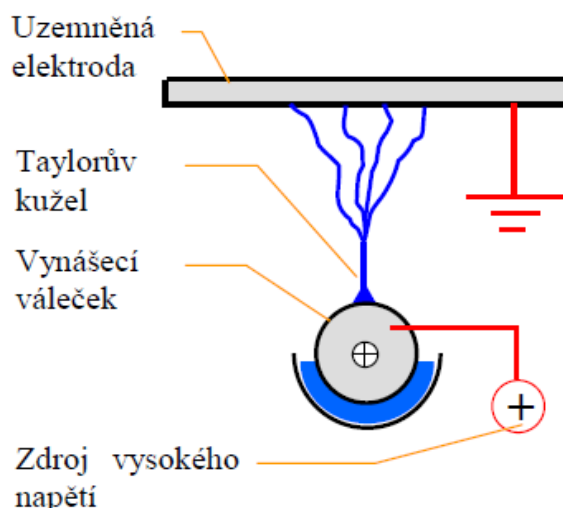
Mezi výhody technologie Nanospider patří především:

- Vysoká výrobní kapacita a rozšiřitelnost
- Vysoká rovnoměrnost průměru vláken a nanosené nanovláknenné vrstvy
- Hospodárný provoz a snadná údržba
- Flexibilita v používání mnoha různých polymerů a podkladových materiálů [18]

U této technologie lze také stanovit všechny výsledky při výrobě nanovláken pomocí přesného nastavení celé řady výrobních parametrů, které jsou pro konečný výrobek rozhodující:

- Parametry roztoku (vodivost, teplota, povrchové napětí, atd.)
- Parametry okolního prostředí (teplota, vlhkost, atd.)
- Základní parametry materiálu (povrchový elektrický odpor, atd.)
- Parametry zařízení (napětí, vzdálenost elektrod, atd.) [18]

Technologie Nanospider využívá jednoduše tvarovaných elektrod, které jsou částečně ponořeny do polymerního roztoku, jsou mechanicky prosté a neobsahují žádné části, které by se mohly snadno zablokovat (v porovnání s elektrospinningem používajícím trysky). Počet vláken vyrobených na jednom zvlákňovacím zařízení je udáván vzdáleností Taylorových kuželů. Při procesu zvlákňování z volné hladiny roztoku polymeru v elektrickém poli je tato vzdálenost udávána přirozeným samo - přizpůsobením Taylorových kuželů. Čím vyšší počet Taylorových kuželů, tím vyšší je nejen produktivita, ale i homogenita a konzistentnější morfologie nanovláknenné vrstvy [18].



Obr. 9 Princip zvlákňování pomocí metody Nanospider [19].

Obr. 9 popisuje proces zvlákňování pomocí metody Nanospider, jejímž principem je elektroda ve tvaru válečku brodícího se v polymerním roztoku. Polymer je válečkem vynášen blíže opačné elektrodě, a proto se na pohybující hladině polymeru samovolně vytvářejí skupiny Taylorových kuželů. Následný postup tvorby nanovláken je stejný, jak bylo uvedeno u elektrospinningu [19].

### 2.7.3 Porovnání nanovláken s ostatními filtračními materiály

Obecně filtrační materiály je velice obtížné porovnávat, neboť podmínky jednotlivých aplikací se velice liší hodnotami požadovaných vlastností i jejich důležitostí. Zároveň parametry materiálů, jež jsou vyrobeny různými technologiemi, se liší. Kritéria pro porovnání materiálů vycházejí z filtračních vlastností, zejména z hodnot efektivity a tlakového spádu, životnosti a odolnosti vůči působení vnějších vlivů. Při porovnání materiálů vyrobených různými technologiemi je vhodné sledovat efektivitu a tlakový spád zároveň, neboť obě tyto filtrační vlastnosti spolu úzce souvisí. Jinou možností je porovnání například efektivity materiálů při konstantním tlakovém spádu [19].

## **3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST**

### **3.1 Cíl práce**

V rámci experimentů bylo u vybraného materiálu obsahující nanovláknna provedeno experimentální vyhodnocení filtračních vlastností a strukturních parametrů. Především bylo nutné určit průměr vláken, tloušťku vrstvy, zaplnění, velikost pórů, průtok vzduchu, efektivitu filtrace a tlakový spád. Pro všechny experimenty bylo k dispozici 5 vzorků s nanovláknennou vrstvou, které nám poskytla společnost Elmarco v Liberci. Vrstvy všech vzorků byly tvořeny papírovým podkladem s nanosenou nanovláknennou vrstvou polyamidu. Vrstvy se od sebe lišily rozdílnou odtahovou rychlostí při přípravě, hlavní předpokládanou proměnnou tedy byla plošná hmotnost.

Hlavním cílem experimentální části této diplomové práce bylo porovnat vztah mezi strukturními parametry a filtračními vlastnostmi zjištěnými na základě experimentu a na základě výpočtu. Dalším cílem bylo určit vhodnou materiálovou konstantu pro určení velikosti pórů na základě znalosti ostatních parametrů.

Na základě experimentu byly u všech připravených vzorků určeny průměry nanovláken a tloušťky nanosených nanovláknenných vrstev polyamidu pomocí programu Lucia, také byly zjištěny další strukturní parametry na základě výpočtu. V našem případě v rámci filtračních vlastností byly použity dvě testovací metody vzduchové filtrace pro testování připravených vzorků, a sice metoda testování filtračních vlastností aerosolem NaCl a metoda testování velikostí pórů tzv. bublinkovou metodou. Došlo k porovnání vztahů mezi strukturními parametry a filtračními vlastnostmi na základě experimentu a na základě výpočtu. Také došlo k porovnání hodnot strukturních parametrů vzniklých na základě experimentu a výpočtu, zejména velikosti pórů. Cílem bylo odhadnout vhodné parametry, aby se vypočtené hodnoty velikosti póru co nejvíce přibližovaly hodnotám naměřeného póru.

### **3.2 Strukturní parametry nanovláknenné vrstvy na základě experimentu**

#### **3.2.1 Průměry vláken**

U všech vzorků bylo provedeno měření průměrů vzniklých vláken pod elektronovým mikroskopem (Phenom). Pomocí programu Lucia bylo postupně u každého vzorku zvlášť proměřeno 100 náhodně vybraných vláken (viz. příloha 1). Statistickými výpočty byla získána

průměrná hodnota průměrů vláken, medián, směrodatná odchylka a 95% IS. Naměřené a vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tab. 2.

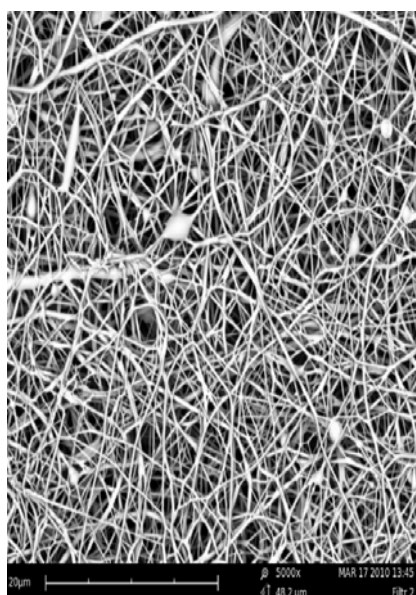
Testované filtry	Průměr vláken $d$ [ $\mu\text{m}$ ]	Medián [ $\mu\text{m}$ ]	Směrodatná odchylka $\sigma$ [ $\mu\text{m}$ ]	95% IS [ $\mu\text{m}$ ]
Vzorek 1	0,26	0,27	0,075	0,015
Vzorek 2	0,34	0,30	0,092	0,018
Vzorek 3	0,35	0,40	0,077	0,015
Vzorek 4	0,36	0,40	0,084	0,016
Vzorek 5	0,10	0,11	0,021	0,004

*Tab. 2 Naměřená a vypočítaná data průměrů vláken všech vzorků.*

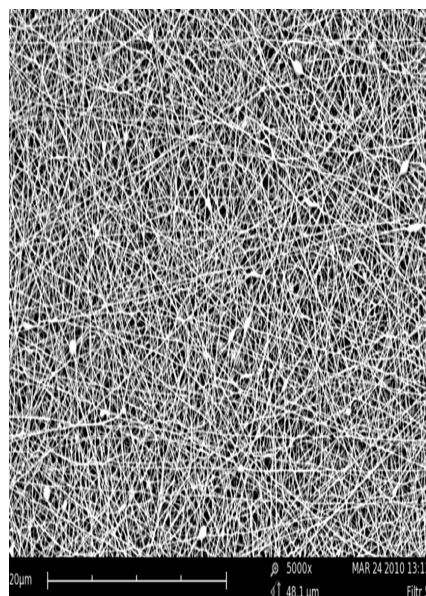
Z tab. 2 vyplývá, že u vzorku 5 nanovláknenná vrstva polyamidu obsahuje vlákna nejmenších průměrů a naopak u vzorku 4 je nanovláknenná vrstva polyamidu složena z vláken největších průměrů v porovnání s ostatními vzorky. Průměry vláken nanosených vrstev vzorků 2, 3 a 4 byly téměř konstantní hodnoty, lišily se pouze v setinách.

Pro představu následující obrázky ukazují 2 vzorky nanovláknenné polyamidové vrstvy s rozdílnými průměry vláken.

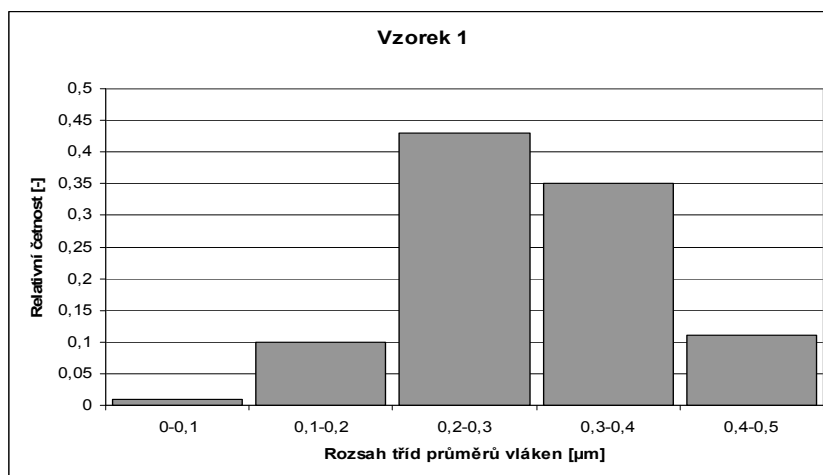
Vzorek 2



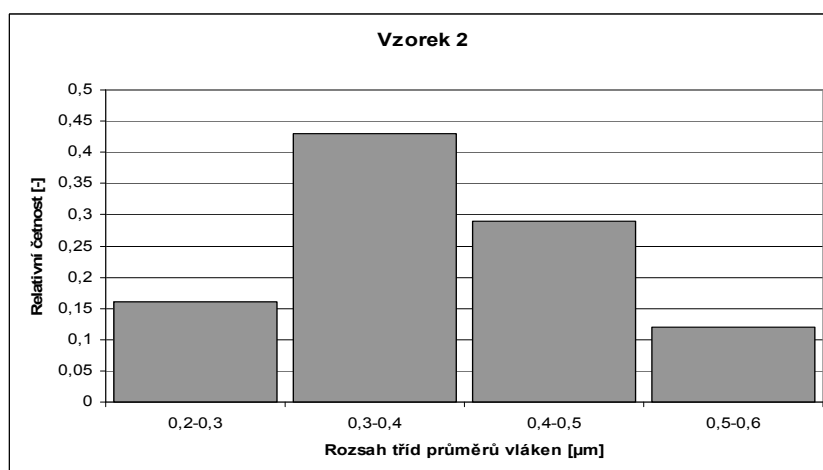
Vzorek 5



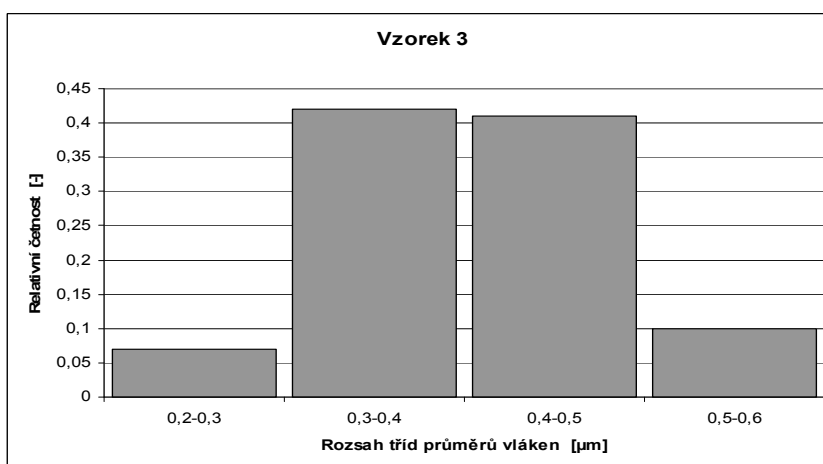
*Obr. 10 Pro porovnání průměry vláken vzorku 2 (vlevo), vzorku 5 (vpravo) pod elektronovým mikroskopem.*



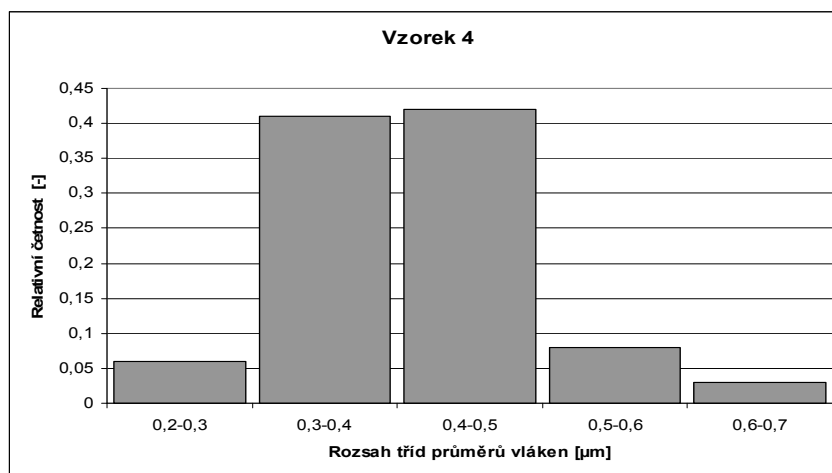
*Graf 1: Histogram četností průměrů vláken vzorku 1.*



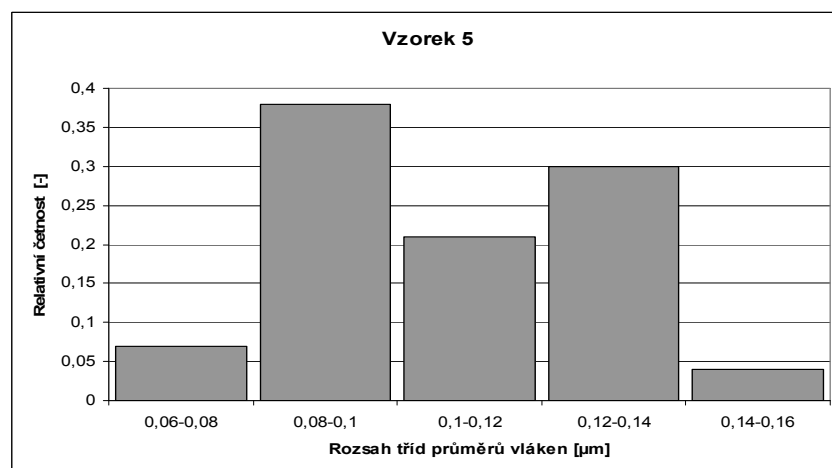
*Graf 2: Histogram četností průměrů vláken vzorku 2.*



*Graf 3: Histogram četností průměrů vláken vzorku 3.*



*Graf 4: Histogram četností průměrů vláken vzorku 4.*



*Graf 5: Histogram četností průměrů vláken vzorku 5.*

Všechny grafy (graf 1 – graf 5) představují grafické znázornění statistického souboru měření průměrů vláken nanovláknenné polyamidové vrstvy nanesené na filtračním papíru. Jedná se o histogramy četností, kde jednotlivé naměřené průměry vláken byly roztříděny do tříd a u každé třídy byla spočtena jejich četnost. U vzorků 2 a 3 vznikly 4 třídy a u zbylých vzorků vzniklo 5 tříd. Velikost třídy byla zvolena u vzorků 1 – 4 po  $0,1 \mu\text{m}$  a u vzorku 5 po  $0,02 \mu\text{m}$ . Podle histogramů 1 – 4 (graf 1 – graf 4) lze říci, že naměřené hodnoty vláken se svým průměrem pohybují v Normálním rozdělení, neboli Gausově. Z grafu 5, tedy z posledního histogramu, vyplývá že naměřené hodnoty vláken se svým průměrem pohybují v bimodálním rozdělení.

### 3.2.2 Tloušťky vrstvy

U všech vzorků bylo podobně jako u průměrů vláken provedeno měření tloušťky vzniklé vrstvy pod elektronovým mikroskopem (Phenom). Pomocí programu Lucia bylo na náhodných místech tloušťky vrstvy každého vzorku provedeno 20 měření (viz. příloha 1), která byla poté statisticky vyhodnocena. Průměrné hodnoty tloušťky vrstev, směrodatná odchylka a IS jsou zaznamenány v následující tab. 3.

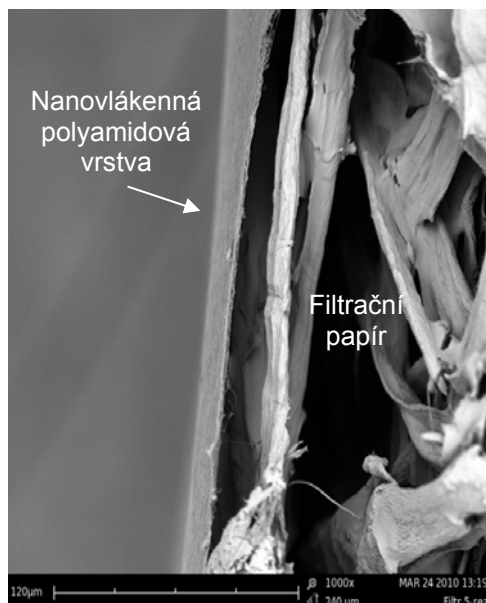
Testované filtry	Tloušťky vrstvy $t$ [ $\mu\text{m}$ ]	Směrodatná odchylka $\sigma$ [ $\mu\text{m}$ ]	95% IS [ $\mu\text{m}$ ]	IS min. [ $\mu\text{m}$ ]	IS max. [ $\mu\text{m}$ ]
Vzorek 1	15,30	4,802	2,105	13,195	17,405
Vzorek 2	13,70	3,935	1,725	11,975	15,425
Vzorek 3	16,95	4,582	2,008	14,942	18,958
Vzorek 4	29,40	6,451	2,827	26,573	32,227
Vzorek 5	5,35	1,531	0,671	4,679	6,021

*Tab. 3 Naměřené a vypočítané průměrné hodnoty tloušťky vrstvy všech vzorků.*

Z tab. 3 je patrné, že největší tloušťku nanovlákněné polyamidové vrstvy obsahoval vzorek 4 a naopak vzorek 5 tvořil nejmenší tloušťku této vrstvy v porovnání s ostatními vzorky.

Pro představu je na obr. 11 zobrazen pod elektronovým mikroskopem vzorek 5, znázorňuje filtrační papír s nanosenou nanovlákněnou vrstvou polyamidu. Z obrázku je patrné, že měření tloušťky vrstvy mohlo být zatíženo chybou danou mechanickým působením při řezu a geometrií.





*Obr. 11 Ukázka nanovláknenné polyamidové vrstvy, nanesené na filtrovní papír, vzniklé pod elektronovým mikroskopem.*

Byly vytvořeny grafy (viz. příloha 1) představující grafické znázornění statistického souboru měření tloušťky nanovláknenné polyamidové vrstvy nanesené na filtrovní papír. Jedná se o histogramy četností, kde jednotlivé naměřené tloušťky nanovláknenných polyamidových vrstev byly roztrženy do tříd a u každé třídy byla spočtena jejich četnost.

U měření tloušťky vrstvy jednotlivých vzorků, byl zaznamenán u některých vzorků velký rozptyl naměřených hodnot (zejména potom u vzorku 4, kde je rozptyl naměřených hodnot 30 µm). Platí, že čím větší je rozptyl naměřených hodnot, je konečný vypočítaný výsledek zaplnění méně přesný. Velikost rozptylu měření tloušťky vrstvy u daných vzorků je potom dána především nerovnoměrností popř. nerovnoběžností povrchu vzorku. Vzorek 4, jehož naměřená tloušťka nanovláknenné polyamidové vrstvy byla největší (viz. tab. 3), měl zároveň i největší naměřenou plošnou hmotnost nanovláknenné vrstvy a tudíž i největší zaplnění (viz. tab. 4) v porovnání s ostatními vzorky.

Všechny tabulky hodnot potřebné pro vytvoření histogramů průměrů vláken a tloušťky nanovláknenné vrstvy jsou také uvedeny v příloze 1.

Elektronový mikroskop Phenom a software pro obrazovou analýzu Lucia jsou umístěny v prostorách laboratoří katedry netkaných textilií.

### 3.3 Strukturní parametry nanovlákněné vrstvy na základě výpočtu

Všechny vzorky se od sebe lišily nejen plošnou a objemovou hmotností, ale bylo nutné určit i další strukturní parametry.

Každý vzorek byl rozdělen na 5 stejných částí, kde z každé části u každého vzorku byla postupně vážena nanovlákněná polyamidová vrstva a následně byly spočteny hodnoty plošné hmotnosti nanovlákněné vrstvy všech vzorků. Z 5-ti zjištěných hodnot plošné hmotnosti nanovlákněné vrstvy každého vzorku byly určeny průměrné hodnoty plošné hmotnosti (viz. tab. 4). Na základě plošné hmotnosti a tloušťky vrstvy byla vypočtena objemová hmotnost dané vrstvy, jež byla použita pro výpočet zaplnění.

Bereme – li v úvahu všech 5 hodnot plošné hmotnosti nanovlákněné vrstvy každého vzorku zvlášť, pak např. maximální hodnota objemové hmotnosti vrstvy je dána poměrem maximální hodnoty plošné hmotnosti nanovlákněné vrstvy daného vzorku s minimální hodnotou tloušťky nanovlákněné vrstvy téhož vzorku. Poté jsou spočteny z vypočtených maximálních hodnot objemové hmotnosti nanovlákněné vrstvy jednotlivých vzorků hodnoty maximálního zaplnění. Všechny výpočty a odchylky zaplnění jsou umístěny v příloze 2.

Hodnoty plošné hmotnosti, průměrné hodnoty plošné hmotnosti a tloušťky nanovlákněné vrstvy, jejich směrodatné odchylky a intervaly spolehlivosti u všech vzorků jsou uvedeny také v příloze 2.

Tab. 4 zobrazuje vypočtené hodnoty průměrné plošné hmotnosti nanovlákněné vrstvy, dále hodnoty objemové hmotnosti nanovlákněné vrstvy, jemnosti vláken a zaplnění všech vzorků, z nichž některé tyto strukturní parametry bylo nutné použít k dalšímu zpracování. Tab. 5 zobrazuje vypočtené hodnoty porózity a průřezu póru.

Testované filtry	Plošná hmotnost $m_p$ [g/m <sup>2</sup> ]	Objemová hmotnost $m_v$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Jemnost vl. T [tex]	Zaplnění $\mu$ [-]
Vzorek 1	0,314	20,5	$0,61 \cdot 10^{-3}$	0,018
Vzorek 2	0,629	45,9	$1,04 \cdot 10^{-3}$	0,040
Vzorek 3	0,971	57,3	$1,10 \cdot 10^{-3}$	0,050
Vzorek 4	3,943	134,1	$1,16 \cdot 10^{-3}$	0,118
Vzorek 5	0,429	80,2	$0,09 \cdot 10^{-3}$	0,070

*Tab. 4 Hodnoty průměrné plošné hmotnosti nanovlákněné vrstvy, objemové hmotnosti nanovlákněné vrstvy, jemností vláken a zaplnění.*

Z tab. 4 vyplývá, že největší průměrnou plošnou hmotnost, objemovou hmotnost vrstvy, ale i jemnost vláken a zaplnění má vzorek 4. Vzorky 2, 3 a 4 jsou jemností vláken nanovlákněné polyamidové vrstvy téměř konstantní a vzorek 5 má nejmenší jemnost vláken nanovlákněné polyamidové vrstvy, ale i průměr vláken, což je vidět v porovnání se vzorkem 2 na obr. 10.

Objemovou hmotnost  $m_v$  neboli hustotu vrstvy či vláken  $\rho_{vl}$  bylo možné určit v takovém případě, když byla známa průměrná plošná hmotnost  $m_p$ . Objemová hmotnost je dána podílem průměrné plošné hmotnosti a průměrné tloušťky vrstvy, kterou již známe z předchozího experimentu, kap. 3.2.2. Uvažujeme - li vzorek 1 o průměrné plošné hmotnosti vrstvy  $m_p = 0,314 \text{ g/m}^2$ , průměrné tloušťce nanovlákněné vrstvy  $t = 15,3 \text{ }\mu\text{m}$ , má objemovou hmotnost  $m_v = 20,5 \text{ kg/m}^3$ .

Vzhledem k tomu že všechny vzorky byly tvořeny nanosenou nanovlákněnou vrstvou polyamidu, pak je nutné pro výpočet jemnosti i zaplnění znát hustotu polyamidu  $\rho_{PAD}$ , která je  $1140 \text{ kg/m}^3$ . Pro výpočet jemnosti bylo dosazeno do vztahu (14), ale nejprve bylo nutné určit plochu průřezu vlákna dle vztahu (11).

Příklad výpočtu je uveden na vzorku 1 s průměrem vlákna  $d = 0,26 \text{ }\mu\text{m}$ , hustota polyamidu  $\rho_{PAD} = 1140 \text{ kg/m}^3$ , pak dle vztahu (11) platí:

$$s = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (0,26 \cdot 10^{-6})^2}{4} = 5,31 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$$

jemnost vláken je pak dle vztahu (14) spočtena následně:

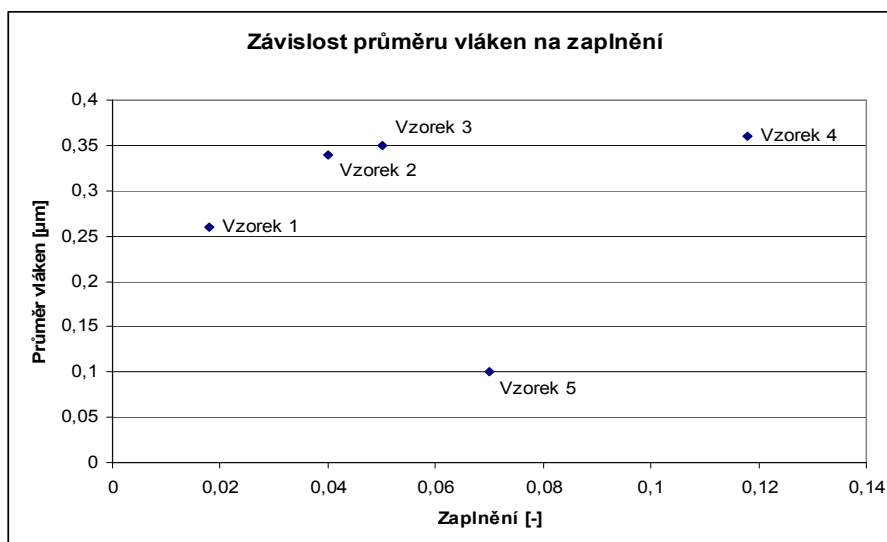
$$T = s \rho_{PAD} = (5,31 \cdot 10^{-14}) \cdot 1140 = 6,05 \cdot 10^{-11} \text{ kg/m} \cdot 10^6 = 6,05 \cdot 10^{-4} \text{ g/km} = 0,61 \cdot 10^{-3} \text{ tex}$$

Např. u vzorku 1 kdy hustota vrstvy či vláken  $\rho_{vl} = 20,5 \text{ kg/m}^3$  a hustota polyamidu  $\rho_{PAD} = 1140 \text{ kg/m}^3$ , lze určit zaplnění dle vztahu (10) následně:

$$\mu = \frac{\rho_{vl}}{\rho_{PAD}} = \frac{20,5}{1140} = 0,018 \text{ [-]}$$

Závislost průměru vláken na zaplnění znázorňuje graf 6. Z grafu je patrné, že data nevykazují závislost mezi průměrem vláken a zaplněním. To může být dáno chybou při měření tloušťky vrstvy, nebo skutečně nejsou průměry vláken závislé na zaplnění v rozsahu daných vzorků. U vzorků 1, 2 a 3 se zvyšujícím se průměrem vláken roste zaplnění.

Vzorek 4, u něž je průměr vláken 0,36  $\mu\text{m}$ , má největší zaplnění - 0,118 [-] ale i největší tloušťku nanosené nanovlákněné polyamidové vrstvy – 29,40  $\mu\text{m}$  (viz. tab. 3) ze všech vzorků. Nejmenší průměr vláken - 0,10  $\mu\text{m}$  ze všech vzorků má vzorek 5 s nanosenou nanovlákněnou polyamidou vrstvou s nejmenším zaplněním – 0,070 [-], nejmenší jemností vláken -  $0,09 \cdot 10^{-3}$  tex a nejmenší tloušťkou nanosené nanovlákněné polyamidové vrstvy – 5,35  $\mu\text{m}$  (viz. tab. 3).



Graf 6: Závislost průměru vláken na zaplnění.

Následující tab. 5 představuje vypočtené hodnoty porózy a průřezu póru všech vzorků.

Testované filtry	Poróza $\Psi$ [-]	Průřez póru $s$ [ $\mu\text{m}^2$ ]
Vzorek 1	0,982	4,79
Vzorek 2	0,960	3,30
Vzorek 3	0,950	1,50
Vzorek 4	0,882	0,99
Vzorek 5	0,930	0,79

Tab. 5 Vypočtené hodnoty porózy a průřezu póru všech vzorků.

Z tab. 5 je zřejmé, že vzorek 1 má největší porózu i průřez póru. Vzorek 4 má nejmenší porózu a vzorek 5 má nejmenší průřez póru.

Bereme – li v úvahu vzorek 1, jehož zaplnění  $\mu = 0,018$  [-], pak dosazením do vztahu (13) byla získána poróza:

$$\psi = 1 - \mu = 1 - 0,018 = 0,982 [-]$$

Z kapitoly 3.4.2 byly zjištěny hodnoty průměru póru, jestliže tentýž vzorek má průměr póru  $d_p = 2,47 \mu m$ , pak průřez póru lze spočítat dle vztahu (11) následným způsobem:

$$s = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 2,47^2}{4} = 4,79 \mu m^2$$

Všechny použité výpočty z této části experimentu byly pro představu uvedeny pouze u vzorku 1. Výpočty ostatních vzorků jsou založeny na stejném principu, po dosazení příslušných hodnot do příslušných vzorců.

### 3.4 Filtrační vlastnosti a velikosti póru na základě experimentu

#### 3.4.1 Testování filtračních vlastností aerosolem NaCl

Metoda testování filtračních vlastností aerosolem NaCl byla použita pro měření tlakového spádu a počáteční efektivity zachytu částic jednotlivých filtrů. Tato metoda je vhodná především pro jemné, vysoce účinné filtry.

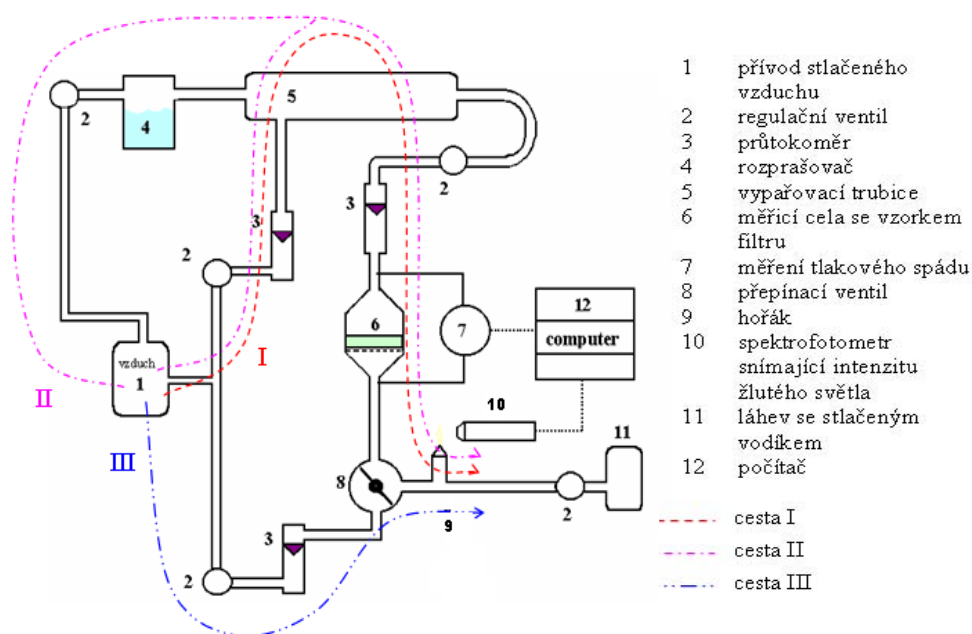
Zařízení pro testování filtračních vlastností aerosolem NaCl s názvem Bench Mounting Rig type 1100 P (obr. 12), jež se nachází v laboratoři testování filtrace katedry netkaných textilií, měří odlučivost polydisperzních částic o velikosti od 0,02 do 2 mm (medián 0,65 mm) a tlakový spád při náletové rychlosti od 1,5 do 9,5 m/min.



Obr. 12 Zařízení pro testování filtračních vlastností aerosolem NaCl [22].

Obecné schéma principu zařízení je zobrazeno na obr. 12. Zařízení pracuje na takovém principu, kde 10% roztok NaCl je rozprášen a zbaven vody ve vypařovací trubici (5). Výsledkem jsou částice soli definované velikosti. Tyto částice nalétávají definovanou rychlostí na testovaný vzorek (6) a při tom je snímán tlakový spád vzorku (7). V hořáku (9) hoří modrý plamen směsi vodíku a vzduchu. Pokud částice NaCl projdou testovaným filtrem, obarví plamen do žluta. Platí fakt čím více částic, tím větší intenzita žluté barvy plamene. Zařízení, jež snímá intenzitu žluté barvy plamene, se nazývá spektrofotometr (10). Výstupem je hodnota napětí v mV.

Pro přesnost měření je velice nutné určit nulový stav zařízení, kdy v hořáku (9) hoří pouze vodík a vzduch je přiváděn cestou I (1).



Obr. 13 Obecné schéma principu zařízení pro testování aerosolem NaCl [3].

Vzduch může v zařízení procházet 3 cestami:

- I. Cesta pro určení nulového stavu přístroje a pro výměnu testovaného filtru - vzduch neprochází filtrem.
- II. Cesta pro určení tlakového spádu filtru a vyčištění přístroje – vzduch prochází filtrem, ale neobsahuje částice soli.
- III. Cesta pro měření průniku částic filtrem.

Parametry testu aerosolem NaCl jsou:

- Velikost částic 0,002 – 2  $\mu\text{m}$ , střední hodnota 0,65  $\mu\text{m}$  (medián)
- Koncentrace částic až do 13  $\text{mg}/\text{m}^3$
- Rychlost náletu částic na filtr 1 – 9,5  $\text{m}/\text{min}$
- Testovací plocha 100  $\text{cm}^2$
- Tloušťka filtru do 150 mm
- Rozsah měření 1 – 99,9997 %

Všech 5 vzorků, tvořených papírovým podkladem s nanosenou nanovláknou vrstvou polyamidu, bylo postupně podrobeno testování vodným roztokem NaCl. Papírovým podkladem materiálu byl filtrační papír, na němž byla nanosená polyamidová nanovláknina. Vzorky se od sebe lišily nejen plošnou hmotností, ale i filtračními vlastnostmi jako je efektivita zachycených částic a tlakový spád.

Účinná plocha filtru, rychlost náletu částic na filtr a průtok vzduchu byly pro všechna měření konstantní.

Následující tab. 6 a tab. 7 znázorňují průměrné hodnoty efektivy filtrace a tlakového spádu filtrů, jejich směrodatné odchylky a 95% IS.

Účinná plocha všech měřených filtrů S byla 0,01  $\text{m}^2$

Rychlost náletu částic na filtr  $v = 5 \text{ m}/\text{min} = 0,083 \text{ m}/\text{s}$

Průtok vzduchu  $Q = 8,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$

Testované filtry	Efektivita filtrace E [%]	Směrodatná odchylka $\sigma$ [%]	95% IS [%]	IS min. [%]	IS max. [%]
Vzorek 1	83,75	0,070	0,098	83,65	83,85
Vzorek 2	94,16	0,018	0,245	93,92	94,41
Vzorek 3	98,55	0,080	0,108	98,45	98,66
Vzorek 4	99,96	0,030	0,039	99,92	100,00
Vzorek 5	99,96	0,050	0,076	99,88	100,04

Tab. 6 Statistická data efektivy filtrů testovaných aerosolem NaCl.

Testované filtry	Tlakový spád $\Delta p$ [Pa]	Směrodatná odchylka $\sigma$ [Pa]	95% IS [Pa]	IS min. [Pa]	IS max. [Pa]
Vzorek 1	163	32,53	45,08	117,92	208,08
Vzorek 2	274	18,38	25,48	248,52	299,48
Vzorek 3	405	4,24	5,88	399,12	410,88
Vzorek 4	697	15,56	21,56	675,44	718,56
Vzorek 5	1646	557,20	772,22	873,78	2418,22

*Tab. 7 Statistická data tlakového spádu filtrů testovaných aerosolem NaCl.*

Z tab. 6 a tab. 7 vyplývá, že se rostoucí efektivitou filtrace jednotlivých vzorků roste tlakový spád. Nejmenší naměřené hodnoty efektivity zachycených částic a tlakového spádu obsahuje vzorek 1, naopak největší naměřené hodnoty efektivity zachycených částic a tlakového spádu obsahuje vzorek 5.

### 3.4.2 Testování velikosti pórů bublinkovou metodou

Jedná se o nepřímou metodu určování velikosti pórů ve filtru. Zařízení pro testování velikosti póru bublinkovou metodou se nazývá Macropulos 5 (obr. 14), je určeno pro měření průměrného a maximálního póru vláknenných útvarů. Zařízení se nachází v laboratoři testování filtrace katedry netkaných textilií.

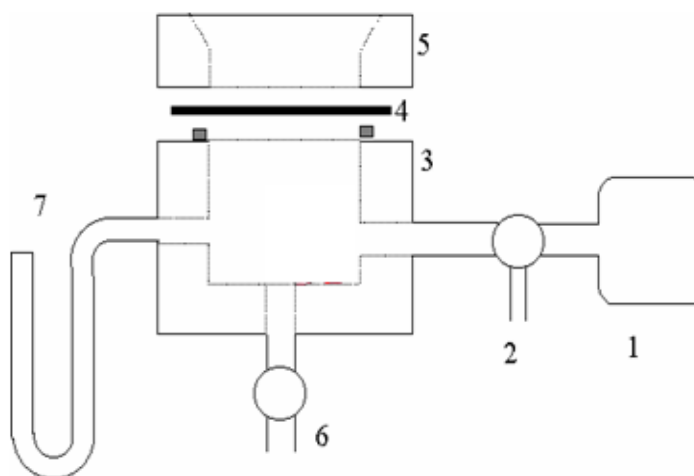
Technické parametry zařízení:

- Minimální měřitelná velikost póru od 100 nm
- Maximální měřitelná velikost póru do 0,5 mm
- Velikost měřené plochy 17,34 cm<sup>2</sup>





Obr. 14 Zařízení Macropulos 5 pro testování velikosti póru bublinkovou metodou.



Obr.15 Schéma principu zařízení Macropulos 5 [23].

Popis zařízení:

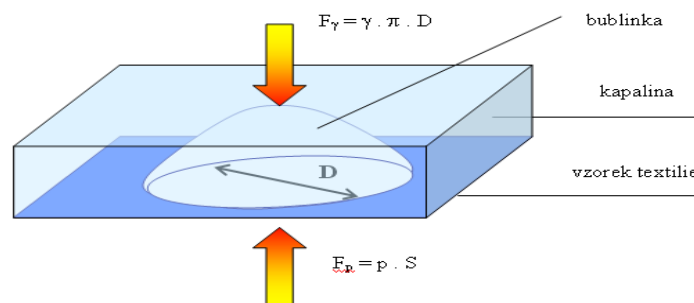
1. Vzduchovací motorek
2. Vzduchový ventilek
3. Testovací cela
4. Testovaný vzorek
5. Upínací hlavice (do níž se nalévá minerální olej)
6. Odpouštěcí ventil
7. Manometr

Pro určení velikosti póru bylo použito již zmíněných 5 vzorků. K dispozici byl také minerální olej s povrchovým napětím 0,029 N/m. Postupně byly testovány všechny vzorky, nejprve bez použití minerálního oleje a následně s jeho použitím.

Jednotlivé kruhové vzorky byly jednotlivě a postupně umístěny do upínací čelisti (5). Následně proběhla kontrola, zda je vzduchový ventil (2) otevřen a ventil pro odtok (6) minerálního oleje uzavřen. Po zapnutí vzduchovacího motorku (1) byl testovaný vzorek (4), který je umístěn v testovací cele (3), zkrápěn minerálním olejem (v případě jeho použití). Vzduchový ventil (2) byl postupně uzavírán a bylo nutné sledovat průtok vzduchu vodního sloupce na průtokoměru a zároveň tlakoměr (7). Následovalo vypnutí vzduchovacího motorku (1), otevření odpouštěcího ventilu (6) a vzduchového ventilu (2).

Každý vzorek byl několikrát proměřen a průměrné hodnoty se staly výslednými pro vytvoření grafů. V každém grafu byly vytvořeny dva průběhy závislosti průtoku vzduchu na jeho tlaku. Jeden průběh byl vytvořen z naměřených hodnot s použitím a druhý průběh bez použití minerálního oleje. U obou průběhů bylo nutné vytvořit vhodnou spojnicí trendu a v místě jejich protnutí byla odečtena hodnota tlaku, která byla použita pro výpočet průměru póru ze vztahu (31), viz. níže. Hodnoty průměru póru všech vzorků jsou uvedeny v tab. 8.

Pro zjištění průměru póru je nutné odvodit vztah pro nějž je nutné znát podstatu bublinkové metody (obr. 16).



Obr. 16 Podstata bublinkové metody [23].

Na obr. 16 je znázorněna síla  $F_\gamma$ , která je daná povrchovým napětím kapaliny působící po obvodu póru  $\pi \cdot D$ . Síla  $F_p$  je daná vnějším tlakem vytěsňujícím kapalinu z póru a působícím na ploše póru  $S$ . Velikost největšího póru v materiálu je z praktického hlediska nejjednodušším zjištěním. Jedná se o místo, ve kterém se při postupném zvyšování tlaku nejprve z póru vytlačí kapalina a následně se objeví první bublinka vzduchu [23].

Odvození vzorce pro výpočet průměru póru:

Platí:  $F_\gamma = F_p$ , z toho vyplývá  $\gamma * \pi * D = p * \frac{\pi * D^2}{4}$ , pak průměr póru  $D = \frac{4\gamma}{p}$  (31)

Naměřené hodnoty byly postupně dosazovány do vztahu (31), a došlo k určení průměru póru všech testovaných vzorků.

Např. vzorek 1, kdy tlak  $p = 47\,000$  Pa po odečtení z grafu, povrchové napětí minerálního oleje  $\gamma = 0,029$  N/m, pak průměr póru  $d_p(D) = \frac{4,0,029}{47000} = 2,47\,\mu m$

Výpočty průměru póru ostatních vzorků jsou založeny na stejném principu, pouze dosazením příslušných hodnot do vzorce (31), viz. příloha 3.

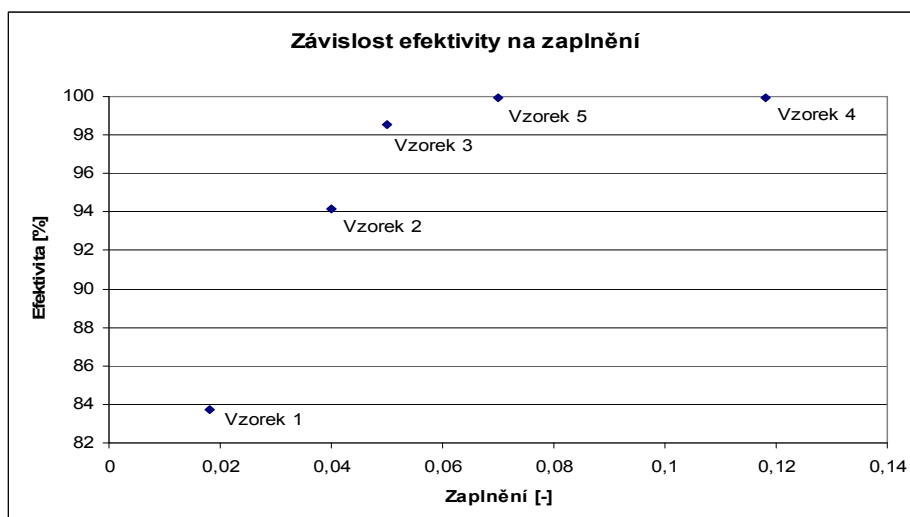
Následující tabulka ukazuje hodnoty průměru póru všech vzorků, po dosazení příslušných hodnot do vzorce (31). Vzorek 1 byl tvořen nanovláknennou polyamidovou vrstvou s největším průměrem póru a vzorek 5 s nanosenou nanovláknennou polyamidovou vrstvou s nejmenším průměrem póru.

Testované filtry	Průměr póru $d_p(D)$ [ $\mu m$ ]
Vzorek 1	2,47
Vzorek 2	2,05
Vzorek 3	1,38
Vzorek 4	1,12
Vzorek 5	1,00

Tab. 8 Hodnoty průměru póru z naměřených hodnot všech testovaných vzorků.

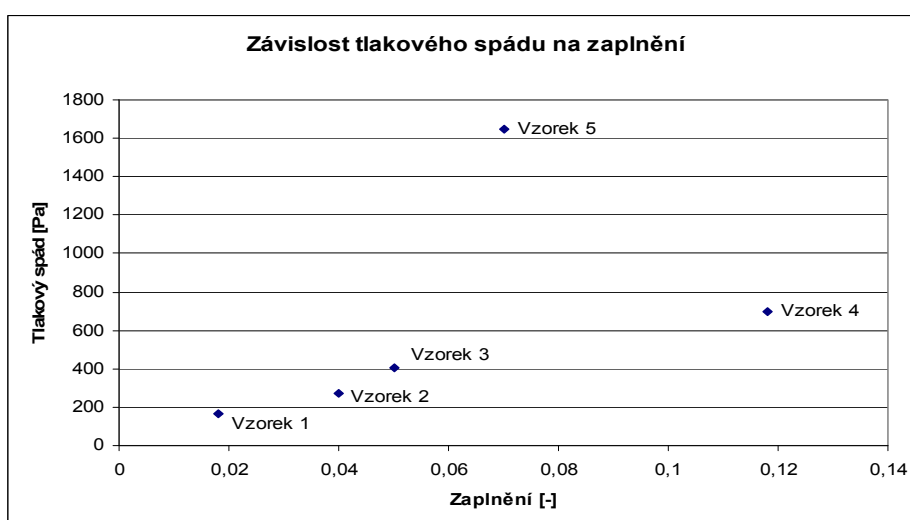
### 3.5 Strukturní parametry ve vztahu s filtračními vlastnostmi

Na základě experimentu byla určena efektivita zachytu částic a tlakový spád, co se týče filtračních vlastností. Ze strukturních parametrů byly výpočtem získány hodnoty zaplnění. Vztah jakým spolu souvisí efektivita zachytu částic se zaplněním a tlakový spád se zaplněním, znázorňují grafy 7 a 8.



*Graf 7: Závislost efektivity zachycených částic na zaplnění.*

Z grafu 7 je zřejmé, že se zvyšující se hodnotou zaplnění vzorku roste efektivita zachycených částic. Tento průběh odpovídá předpokládanému vlivu zaplnění, kdy se nárůst efektivity postupně zpomaluje.



*Graf 8: Závislost tlakového spádu na zaplnění.*

Graf 8 ukazuje, že u vzorků 1 – 3 se zvyšujícím se zaplněním roste tlakový spád. Největší zaplnění – 0,118 [-] má vzorek 4, kdy jeho hodnota tlakového spádu je 697 Pa. Vzorek 5, jehož hodnota zaplnění je 0,070 [-], má největší tlakový spád – 1646 Pa. Z grafu je patrné, že data nevykazují jasný průběh. To je dáno zejména odlišnou jemností vláken vzorku 5, kde větší specifický povrch vláken více působí na brzdění proudu vzduchu a tím i na růst tlakového spádu.

Efektivitu zachycených částic by bylo možné určit i výpočtem dle vztahu (2). Ovšem by to bylo dosti složité, mechanismy filtrace jsou komplikované a proto jej nelze vyjádřit, tudíž výpočty efektivity zachycených částic se neprovádí. Efektivita zachycených částic zjištěna experimentálně byla pro účel této práce dostačující.

### 3.6 Velikosti pórů na základě výpočtů a určení vhodné materiálové konstanty

V rámci kap. 3.4.2 byly určeny průměry pórů každého vzorku. Pro porovnání bylo nutné určit průměr póru jednotlivých vzorků na základě výpočtů s použitím variant z kap. 2.6. Tab. 9 ukazuje porovnání hodnot průměrů pórů zjištěných na základě experimentu a na základě výpočtu.

Testované filtry	Průměr póru z experimentu $d_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	Průměr póru z výpočtu var. I. $d_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	Průměr póru z výpočtu var. II. $d_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	Průměr póru z výpočtu var. III. $d_p$ [ $\mu\text{m}$ ]
Vzorek 1	2,47	14,18	1,92	1,29
Vzorek 2	2,05	8,16	1,67	1,21
Vzorek 3	1,38	6,65	1,53	1,14
Vzorek 4	1,12	2,69	0,98	0,80
Vzorek 5	1,00	1,33	0,36	0,28

Tab. 9 Hodnoty průměrů pórů zjištěných na základě experimentu a na základě výpočtu.

Z tab. 9 je zřejmé, že hodnoty průměrů pórů zjištěné na základě experimentu se různě odlišují od hodnot průměrů pórů získaných výpočtem, v závislosti na použitých variantách a s nimi spojených vztazích výpočtů. Průměry pórů z výpočtu varianty I. jsou několikanásobně větší než průměry pórů zjištěné experimentálně. Hodnoty průměrů pórů z varianty II. a varianty III. jsou téměř blízké hodnotám průměrů pórů získaných experimentálně.

Pro výpočty průměrů pórů z jednotlivých variant je nutné znát pro všechny 3 varianty zaplnění a průměry vláken všech vzorků. Pro všechny 3 varianty berme v úvahu tvarový faktor pórů  $q_p = 0$  [-] a vhodný parametr  $k = 1$  [-].

Příklady výpočtů průměrů pórů nanovlákněné polyamidové vrstvy vzorku 1 dle všech variant. Z předchozích experimentů 1 a 2 byly zjištěny hodnoty zaplnění  $\mu = 0,018$  [-] a průměr vláken  $d = 0,26 \text{ }\mu\text{m}$ , pak je určena hodnota průměru póru dle vztahu (25) z varianty I. následujícím způsobem:

$$d_p = \frac{1}{1+q} \frac{1-\mu}{\mu} d = \frac{1-0,018}{0,018} 0,26 = 14,18 \text{ }\mu\text{m},$$

dle vztahu (27) z varianty II. následně:

$$d_p = \frac{k}{1+q} \sqrt{\frac{1-\mu}{\mu}} d = \sqrt{\frac{1-0,018}{0,018}} 0,26 = 1,92 \text{ }\mu\text{m},$$

dle vztahu (28) empiricky zobecněné varianty III. :

$$d_p = \frac{k}{1+q} \left( \frac{1-\mu}{\mu} \right)^a d = \left( \frac{1-0,018}{0,018} \right)^{0,4} 0,26 = 1,29 \text{ }\mu\text{m}.$$

Ve variantě III. bylo nutné zvolit vhodný parametr  $a$ . V našem případě byl určen vhodný parametr  $a = 0,4$  [-]. Tento parametr byl pro všechny vzorky konstantní.

Stejným způsobem, dosazením příslušných hodnot do příslušných vzorců z jednotlivých variant byly získány všechny hodnoty průměrů pórů, jež ukazuje tab. 9.

Dále následují výpočty parametru  $k$  [-] dle rovnice Carman – Kozeny (30) pro všechny vzorky a poté výpočty parametru  $k$  [-] dle jednotlivých variant.

Následující tab. 10 představuje hodnoty výpočtu parametru  $k$  [-] dle rovnice Carman – Kozeny a k tomu potřebné hodnoty objemového povrchu vláken.

Testované filtry	Objemový povrch vláken $\gamma_{vl}$ [ $\mu\text{m}^{-1}$ ]	Výpočet parametru k [-]
Vzorek 1	15,38	$4,75 \cdot 10^{-3}$
Vzorek 2	11,76	$10,43 \cdot 10^{-3}$
Vzorek 3	11,43	$12,46 \cdot 10^{-3}$
Vzorek 4	11,11	$33,96 \cdot 10^{-3}$
Vzorek 5	40,00	$14,35 \cdot 10^{-3}$

Tab. 10 Výpočty objemového povrchu vláken a parametru k dle rovnice Carman – Kozeny.

Z tab. 10 vyplývá, že největší hodnotu parametru k [-] má vzorek 4 a nejmenší hodnotu parametru k [-] má vzorek 1. Také je zřejmé, že objemový povrch vláken  $\gamma_{vl}$  vzorků 2, 3 a 4 jsou velice blízké hodnoty, liší se pouze v desetinách.

Objemový povrch vláken je dán vztahem:

$$\gamma_{vl} = \frac{4(1+q)}{d} \quad [\text{m}^{-1}] \quad [16] \quad (32)$$

Příklad výpočtu objemového povrchu vláken vzorku 1, kdy tvarový faktor vláken  $q = 0$  [-] a průměr vlákna  $d = 0,26 \mu\text{m}$ , pak dosazením do vztahu (32) je výpočet objemového povrchu vláken  $\gamma_{vl} = 15,38 \mu\text{m}^{-1}$ . Tvarový faktor vlákna  $q = \text{konstantní}$  pro všechny vzorky a průměry vláken byly určeny v experimentu 1.

Pro výpočet parametru k [-] je nutné znát některé hodnoty z předchozích experimentů. Uvažujeme – li vzorek 1, pak tlakový spád  $\Delta p = 163 \text{ Pa}$ , zaplnění  $\mu = 0,018$  [-], tloušťka vrstvy  $t \text{ (H)} = 15,3 \mu\text{m}$ , objemový povrch vláken  $\gamma_{vl} = 15,38 \mu\text{m}^{-1}$ .

Dynamická viskozita vzduchu  $\eta = 1,002 \cdot 10^{-3} \text{ Pa.s}$ , průtok vzduchu  $Q = 8,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  a účinná plocha filtru  $S = 0,01 \text{ m}^2$ .

Ze vztahu (30) vyjádřením parametru k [-] a dosazením příslušných hodnot do vzorce získáme výpočet parametru k:

$$Q = \frac{k^2}{2\gamma_{vl}^2 \eta} \frac{S_c \Delta p}{H} \frac{(1-\mu)^3}{\mu^2} \quad \text{vyjádření k:} \quad k = \sqrt{\frac{2Q\eta H \mu^2}{\gamma_{vl}^2 S_c \Delta p (1-\mu)^3}}$$

po dosazení:

$$k = \sqrt{\frac{2Q\eta H\mu^2}{\gamma_{vl}^2 S_c \Delta p (1-\mu)^3}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (8,3 \cdot 10^{-4}) \cdot (1,002 \cdot 10^{-3}) \cdot (15,3 \cdot 10^{-6}) \cdot 0,018^2}{(15,38 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 0,01 \cdot 163 \cdot (1-0,018)^3}} = 4,75 \cdot 10^{-3} \text{ [-]}$$

Výpočty parametru  $k$  [-] všech vzorků byly provedeny stejným způsobem, pouze dosazením příslušných parametrů jednotlivých vzorků do vzorce (30).

Dynamická viskozita vzduchu, průtok vzduchu a účinná plocha filtrů jsou pro všechny vzorky konstantní.

Výpočty parametru  $k$  [-] dle jednotlivých variant a jejich průměrné hodnoty ukazuje tab. 11.

Testované filtry	Odhady parametru $k$ [-] pro var. I.	Odhady parametru $k$ [-] pro var. II.	Odhady parametru $k$ [-] pro var. III.
Vzorek 1	0,17	1,29	1,91
Vzorek 2	0,25	1,23	1,69
Vzorek 3	0,21	0,90	1,21
Vzorek 4	0,42	1,14	1,40
Vzorek 5	0,75	2,78	3,57
Průměrná hodnota 5-ti vzorků $\bar{k}_5$	0,36	1,47	1,96
Průměrná hodnota 3 vybraných vzorků $\bar{k}_3$	0,29	1,09	1,43

*Tab. 11 Odhady parametru  $k$  [-] pro všechny 3 varianty a průměrné hodnoty. Hodnoty parametru  $k$  a průměrné hodnoty 3 vybraných vzorků jsou pro přehlednost zvýrazněny zelenou barvou.*

Tab. 11 ukazuje odhad parametru  $k$  [-] pro všechny vzorky a zároveň pro všechny 3 varianty. Dále ukazuje průměrné hodnoty všech vzorků a průměrné hodnoty 3 vybraných vzorků.



Vzorky 2, 3 a 4 byly vybrány z toho důvodu, že mají velice podobné průměry vláken, liší se pouze v setinách a z toho důvodu je lze mezi sebou jednoznačně porovnávat. Hodnoty těchto 3 vzorků se staly výchozími pro vytvoření grafu 15.

Odhad parametru  $k$  [-] je určen podílem průměru póru získaného experimentálně ku průměru póru z výpočtu. Například odhad parametru  $k$  [-] pro var. I. je určen podílem průměru póru vzorku 1 získaného experimentálně ku průměru póru vzorku 1 z výpočtu var. I.

$$\text{Tzn. : } k = \frac{2,47}{14,18} = 0,17 \text{ [-]}$$

Obdobným způsobem jsou určeny odhady parametru  $k$  pro var. II. a odhady parametru  $k$  pro var. III.

Hodnoty parametru  $k$  [-] získané výpočtem z rovnice Carman – Kozeny jsou velice vysoké hodnoty, od výpočtu parametru  $k$  [-] dle jednotlivých variant se velice liší, a proto pro další část experimentu není třeba tyto hodnoty dále používat. Staly se pouze výchozími hodnotami pro porovnání s výpočty parametru  $k$  [-] dle jednotlivých variant.

Nyní následuje výpočet průměrů pórů jednotlivých variant s použitím vhodného parametru  $k$  [-], jež byl získán výpočtem dle jednotlivých variant (viz. tab. 11). Nejprve budou vypočteny hodnoty průměru póru všech vzorků s použitím příslušného parametru  $k$  [-] (viz. tab. 12). Dále budou vypočteny hodnoty průměru póru 3 vybraných vzorků s použitím příslušného parametru  $k$  [-] (viz. tab. 13) a to těch vzorků, jež mají téměř konstantní jemnosti vláken, průměry vláken i objemový povrch vláken. Z jichž získaných hodnot budou vytvořeny grafy.

Testované filtry	Průměr póru z výpočtu var. I. $d_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	Průměr póru z výpočtu var. II. $d_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	Průměr póru z výpočtu var. III. $d_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	Průměr póru z experimentu $d_p$ [ $\mu\text{m}$ ]
Vzorek 1	5,11	2,82	2,52	2,47
Vzorek 2	2,94	2,45	2,38	2,05
Vzorek 3	2,40	2,24	2,23	1,38
Vzorek 4	0,97	1,45	1,58	1,12
Vzorek 5	0,48	0,54	0,55	1,00

*Tab. 12 Výpočty průměrů pórů všech vzorků ze všech variant a průměry pórů získaných na základě experimentu.*

Z tab. 12 je zřejmé, že největší hodnoty průměru póru byly určeny z výpočtu varianty I. Naopak nejmenší hodnoty průměru póru byly určeny z výpočtu varianty III. Pro výpočty průměru póru byla pro každou variantu použita průměrná hodnota parametru  $k$  [-] ze všech vzorků. Každá varianta obsahovala jinou průměrnou hodnotu parametru  $k$  [-] všech vzorků (viz. tab.11).

Příklad výpočtu průměru póru z varianty I. vzorku 1 dle vztahu (22), jehož hodnota zaplnění  $\mu = 0,018$  [-], průměr vláken  $d = 0,26 \mu\text{m}$  a průměrná hodnota všech vzorků  $\bar{k}_5 = 0,36$  [-]. Pak průměr póru vzorku 1 z varianty I.:

$$d_p = k \frac{1-\mu}{\mu} d = 0,36 \frac{1-0,018}{0,018} 0,26 = 5,11 \mu\text{m}$$

Příklad výpočtu průměru póru z varianty II. vzorku 1 dle vztahu (27), jehož hodnota zaplnění  $\mu = 0,018$  [-], průměr vláken  $d = 0,26 \mu\text{m}$  a průměrná hodnota všech vzorků  $\bar{k}_5 = 1,47$  [-]. Pak průměr póru vzorku 1 z varianty II.:

$$d_p = \frac{k}{1+q} \sqrt{\frac{1-\mu}{\mu}} d = \frac{1,47}{1} \sqrt{\frac{1-0,018}{0,018}} 0,26 = 2,82 \mu\text{m}$$

Příklad výpočtu průměru póru z varianty III. vzorku 1 dle vztahu (28), jehož hodnota zaplnění  $\mu = 0,018$  [-], průměr vláken  $d = 0,26 \mu\text{m}$ , zvolený parametr  $a = 0,4$  [-] a průměrná hodnota všech vzorků  $\bar{k}_5 = 1,96$  [-]. Pak průměr póru vzorku 1 z varianty III.:

$$d_p = \frac{k}{1+q} \left( \frac{1-\mu}{\mu} \right)^a d = \frac{1,96}{1} \left( \frac{1-0,018}{0,018} \right)^{0,4} 0,26 = 2,52 \mu\text{m}$$

Tvarový faktor vlákna  $q = 0$  [-] byl pro všechny vzorky ve všech použitých variantách konstantní. Zvolený parametr  $a = 0,4$  [-] použitý ve variantě III. byl také pro všechny vzorky konstantní.

Všechny spočtené hodnoty průměru póru získané ze všech variant jsou založené na stejných principech výpočtů, pouze dosazením příslušných hodnot parametrů do příslušných vzorců jednotlivých variant.

Následující tab. 13 představuje hodnoty výpočtů průměru póru pouze 3 vybraných vzorků, jejichž hodnoty jemnosti a průměru vláken byly téměř shodné, lišily se pouze v desetínách případně setinách.

Testované filtry	Průměr póru z výpočtu var. I. $d_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	Průměr póru z výpočtu var. II. $d_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	Průměr póru z výpočtu var. III. $d_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	Průměr póru z experimentu $d_p$ [ $\mu\text{m}$ ]
Vzorek 1	-	-	-	-
Vzorek 2	2,37	1,82	1,73	2,05
Vzorek 3	1,93	1,66	1,63	1,38
Vzorek 4	0,74	1,07	1,15	1,12
Vzorek 5	-	-	-	-

Tab. 13 Výpočty hodnot průměrů pórů 3 vybraných vzorků ze všech variant.

Z tab. 13 je zřejmé, že největší hodnoty průměru póru byly získány z výpočtu varianty I. Naopak nejmenší hodnoty průměru póru byly získány z výpočtu varianty III. Pro výpočty průměru póru byla pro každou variantu použita průměrná hodnota parametru  $k$  [-] z jichž vybraných 3 vzorků. Každá varianta obsahovala jinou průměrnou hodnotu parametru  $k$  [-] vybraných 3 vzorků (viz. tab.11).

Příklad výpočtu průměru póru z varianty I. vzorku 2 dle vztahu (22), jehož hodnota zaplnění  $\mu = 0,040$  [-], průměr vláken  $d = 0,34$   $\mu\text{m}$  a průměrná hodnota 3 vzorků  $\bar{k}_3 = 0,29$  [-]. Pak průměr póru vzorku 2 z varianty I.:

$$d_p = k \frac{1-\mu}{\mu} d = 0,29 \frac{1-0,04}{0,04} 0,34 = 2,37 \mu\text{m}$$

Příklad výpočtu průměru póru z varianty II. vzorku 2 dle vztahu (27), jehož hodnota zaplnění  $\mu = 0,040$  [-], průměr vláken  $d = 0,34$   $\mu\text{m}$  a průměrná hodnota 3 vzorků  $\bar{k}_3 = 1,09$  [-]. Pak průměr póru vzorku 2 z varianty II.:

$$d_p = \frac{k}{1+q} \sqrt{\frac{1-\mu}{\mu}} d = \frac{1,09}{1} \sqrt{\frac{1-0,04}{0,04}} 0,34 = 1,82 \mu\text{m}$$

Příklad výpočtu průměru póru z varianty III. vzorku 2 dle vztahu (28), jehož hodnota zaplnění  $\mu = 0,040$  [-], průměr vláken  $d = 0,34 \text{ }\mu\text{m}$ , zvolený parametr  $a = 0,4$  [-] a průměrná hodnota 3 vzorků  $\bar{k}_3 = 1,43$  [-]. Pak průměr póru vzorku 2 z varianty III.:

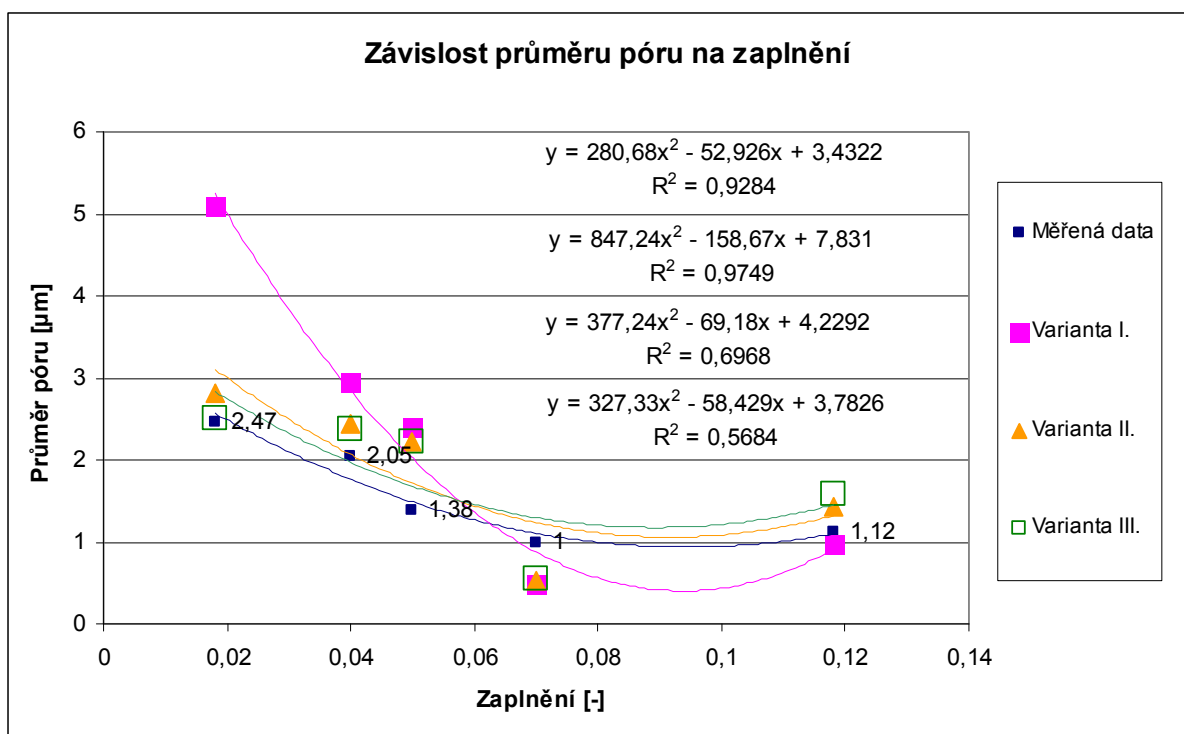
$$d_p = \frac{k}{1+q} \left( \frac{1-\mu}{\mu} \right)^a d = \frac{1,43}{1} \left( \frac{1-0,04}{0,04} \right)^{0,4} 0,34 = 1,73 \text{ }\mu\text{m}$$

Tvarový faktor vlákna  $q = 0$  [-] byl pro všechny vzorky ve všech použitých variantách konstantní. Zvolený parametr  $a = 0,4$  [-] použitý ve variantě III. byl také pro všechny vzorky konstantní.

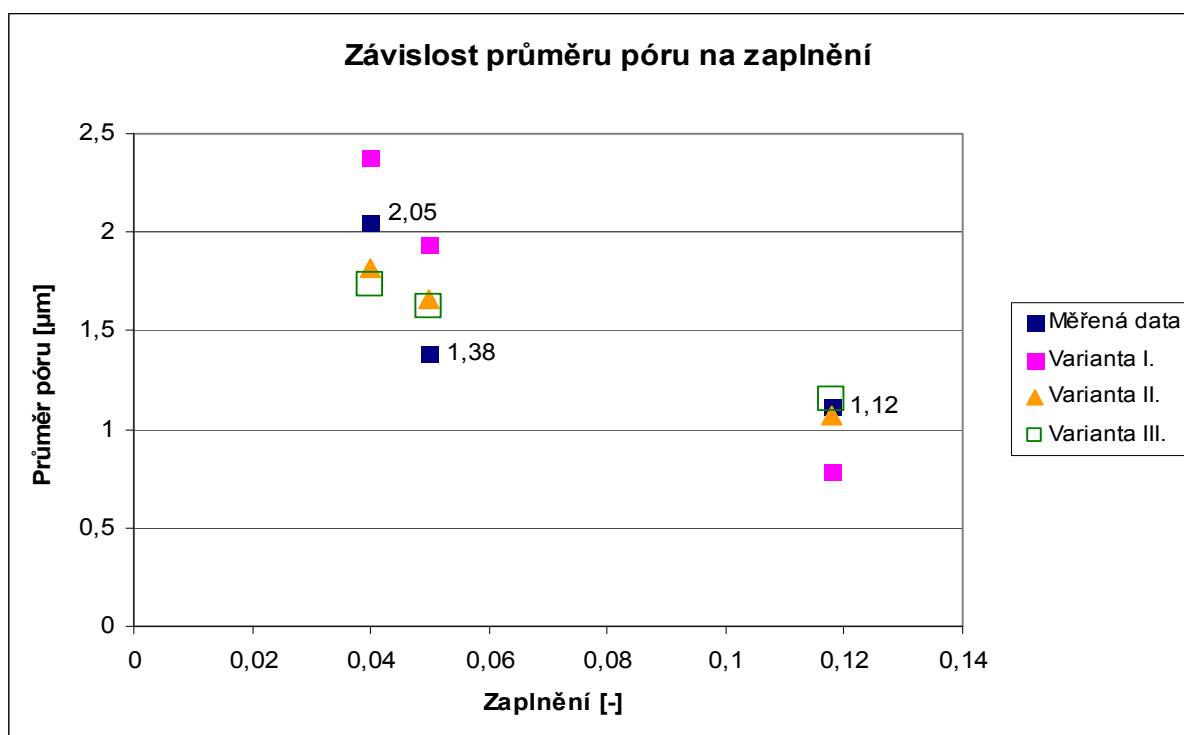
Všechny spočtené hodnoty průměru póru z jednotlivých variant byly získány stejným způsobem, pouze dosazením příslušných hodnot parametrů do příslušných vzorců.

Z hodnot tab. 12 a tab. 13 byly v závislosti na zaplnění vytvořeny graf 9 a graf 10. Graf 9 znázorňuje 4 průběhy závislostí průměru póru na zaplnění, z nichž každý průběh představuje hodnoty všech 5-ti vzorků určených experimentálně a výpočtem z jednotlivých variant. U všech průběhů byla vytvořena spojnice trendu a každému trendu přísluší rovnice regrese s hodnotou spolehlivosti R. Čím více se hodnota spolehlivosti R blíží číslu 1, tím rozumíme větší přesnost. Z grafu je patrné, že některé hodnoty se výrazně vychylují. Je to dáno odlišnými parametry jednotlivých vzorků. Vzorky 2, 3 a 4 svými hodnotami průměrů vláken i jemností vláken jsou téměř konstantní. Z toho důvodu byl vytvořen graf 10. Tento graf znázorňuje 4 průběhy závislostí průměru póru na zaplnění, z nichž každý průběh představuje hodnoty 3 vybraných vzorků.

Cílem bylo odhadnout vhodné parametry, aby se vypočtené hodnoty velikosti póru co nejvíce přibližovaly hodnotám velikosti póru naměřeného. Vycházíme – li z grafu 10, dá se říci že naměřené hodnoty se téměř kryjí s hodnotami vypočtenými. Je to dáno tím, že jednotlivé vzorky se svými hodnotami průměrů i jemností vláken velice shodují. Pro výpočty průměru póru z varianty III. byl zvolen parametr  $a = 0,4$  [-]. Hodnota zvoleného parametru se jevila jako nejvhodnější.



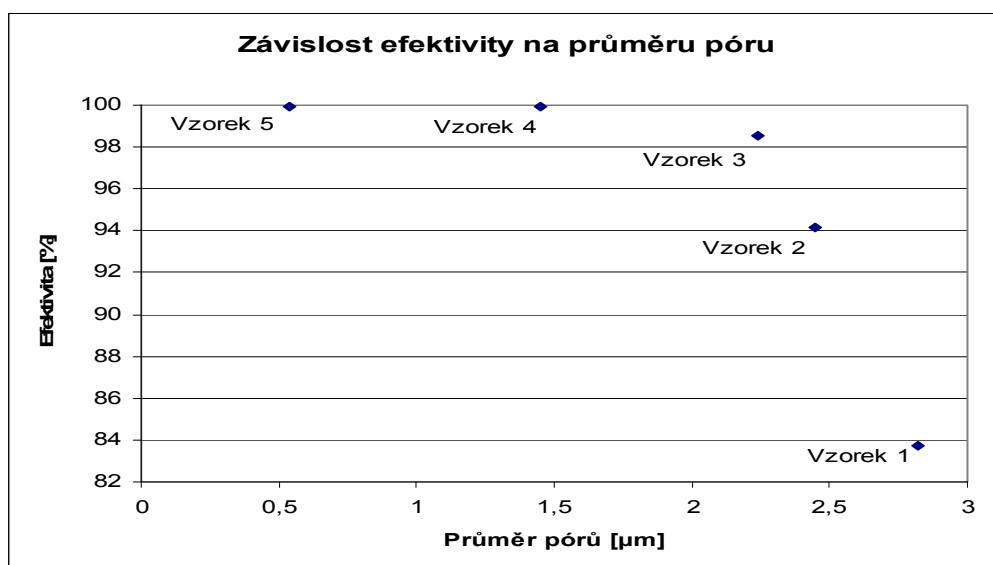
Graf 9: Závislost průměru póru na zaplnění všech 5-ti vzorků.



Graf 10: Závislost průměru póru na zaplnění 3 vybraných vzorků.

### 3.6.1 Závislost filtračních vlastností na velikosti pórů získaných výpočtem

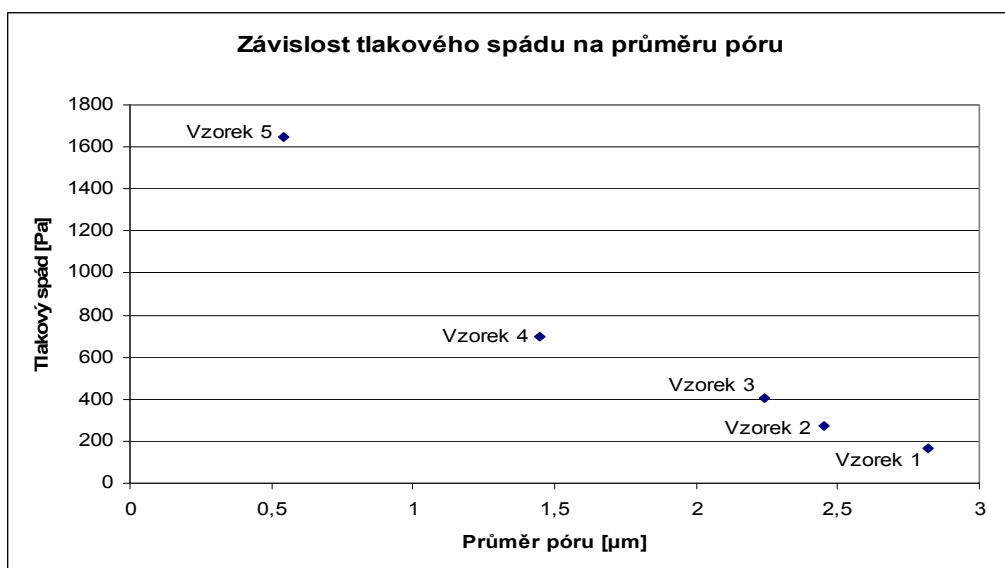
Hodnoty výpočtů průměrů pórů z varianty II. se nejvíce přibližují naměřeným hodnotám průměrů pórů, proto byly vytvořeny grafy závislostí filtračních vlastností na průměru póru získané výpočtem z varianty II. Pro výpočty průměrů pórů z této varianty II. byla použita příslušná průměrná hodnota parametru  $k$  [-] všech vzorků varianty II. (viz. tab. 11). Graf 11 znázorňuje závislost efektivity zachycených částic na průměru póru získaného výpočtem z varianty II., graf 12 znázorňuje závislost tlakového spádu na průměru póru získaného výpočtem z varianty II.



Graf 11: Závislost efektivity zachycených částic na průměru póru získaného výpočtem z varianty II. s použitím vhodné průměrné hodnoty parametru  $k$ .

Z grafu 11 je zřejmé, že s klesající efektivitou zachycených částic jednotlivých vzorků se vypočtené hodnoty průměrů pórů jednotlivých vzorků zvyšují. Vzorek 1 má největší průměr póru a nejmenší efektivitu zachycených částic ze všech 5-ti testovaných vzorků, naopak vzorek 5 má nejmenší průměr póru a největší efektivitu zachycených částic ze všech 5-ti testovaných vzorků. Hodnota průměru póru vzorku 1 vypočteného z var. II. je 2,82  $\mu\text{m}$  (viz. tab. 12) a efektivita zachycených částic je 83,75 % (viz. tab. 6). Hodnota průměru póru vzorku 5 vypočteného z var. II. je 0,54  $\mu\text{m}$  (viz. tab. 12) a efektivita zachycených částic je 99,96 % (viz. tab. 6).

Zařízení pro měření filtračních vlastností aerosolem NaCl měří odlučivost polydisperzních částic o velikosti od 0,02 do 2  $\mu\text{m}$ , tudíž z grafu je zřejmé že efektivita zachycených částic klesá u vzorků jejichž průměr póru je větší než 2  $\mu\text{m}$ , zejména u vzorku 3, vzorku 2 a vzorku 1. Tento fakt je nepřímým důkazem správnosti vypočítaných hodnot velikosti póru.



*Graf 12: Závislost tlakového spádu na průměru póru získaného výpočtem z varianty II. s použitím vhodné průměrné hodnoty parametru  $k$ .*

Z grafu 12 je patrné, že s klesajícím tlakovým spádem jednotlivých vzorků se vypočtené hodnoty průměrů pórů jednotlivých vzorků zvyšují. Vzorek 1 má největší průměr póru a nejmenší tlakový spád ze všech 5-ti testovaných vzorků, naopak vzorek 5 má nejmenší průměr póru a největší tlakový spád ze všech 5-ti testovaných vzorků. Hodnota průměru póru vzorku 1 vypočteného z var. II. je  $2,82 \mu\text{m}$  (viz. tab. 12) a tlakový spád je  $163 \text{ Pa}$  (viz. tab. 7). Hodnota průměru póru vzorku 5 vypočteného z var. II. je  $0,54 \mu\text{m}$  (viz. tab. 12) a tlakový spád je  $1\,646 \text{ Pa}$  (viz. tab. 7).

Obecně lze říci, že s klesajícími hodnotami filtračních vlastností jednotlivých vzorků se hodnoty průměru póru zvyšují, nebo - li s rostoucími hodnotami filtračních vlastností jednotlivých vzorků se hodnoty průměru póru snižují.

Jak již bylo zmíněno v kap. 3.5, efektivitu zachycených částic by bylo možné zjistit i na základě výpočtu ze vztahu (2). Bylo by to dosti složité, neboť mechanismy filtrace jsou komplikované a proto jej nelze vyjádřit, z toho důvodu se výpočty efektivy zachycených částic neprovádí.

## 4 DISKUSE VÝSLEDKŮ

### **Experiment 1: Strukturní parametry nanovláknenné vrstvy na základě experimentu**

V první části experimentu 1 bylo pomocí programu Lucia provedeno měření průměrů vláken nanosených nanovláknenných vrstev jednotlivých vzorků vzniklých pod elektronovým mikroskopem. V tab. 2 jsou uvedeny průměrné hodnoty průměrů vláken. Průměry vláken nanosených vrstev vzorků 2, 3 a 4 byly téměř konstantní hodnoty, lišily se pouze v setinách. Pro každý vzorek zvlášť byly sestaveny histogramy četností průměrů vláken. Z grafů 1 – 4 je zřejmé, že naměřené hodnoty vláken se svým průměrem pohybují v Normálním neboli Gausově rozdělení. Z grafu 5 vyplývá, že naměřené hodnoty vláken se svým průměrem pohybují v bimodálním rozdělení.

V druhé části experimentu bylo podobně jako u průměrů vláken pomocí programu Lucia provedeno měření tloušťky nanosené nanovláknenné vrstvy polyamidu každého vzorku. Průměrné hodnoty tloušťky vrstvy jsou zaznamenány v tab. 3., ze které je patrná největší tloušťka nanovláknenné vrstvy vzorku 4 a nejmenší tloušťka nanovláknenné vrstvy vzorku 5. U některých vzorků při měření tloušťky vrstvy byl zaznamenán velký rozptyl naměřených hodnot. Pro každý vzorek zvlášť byly také sestaveny histogramy, tentokrát četností tloušťky vrstvy, jež jsou umístěny v příloze 1.

### **Experiment 2: Strukturní parametry nanovláknenné vrstvy na základě výpočtu**

Experiment 2 se zabýval určením strukturních parametrů nanovláknenné polyamidové vrstvy každého vzorku. Hodnoty průměrné plošné hmotnosti nanovláknenné vrstvy každého vzorku, objemové hmotnosti nanovláknenné vrstvy každého vzorku, jemnosti vláken a zaplnění zobrazuje tab. 4., porózitu a průřez póru tab. 5. Největší průměrnou plošnou hmotnost, objemovou hmotnost nanovláknenné vrstvy, jemnost vláken a zaplnění má vzorek 4. Největší porózitu a průřez póru má vzorek 1. Závislost průměru vláken na zaplnění znázorňuje graf 6, z něhož je patrné, že data nevykazují závislost mezi průměrem vláken a zaplněním. Může to být způsobeno chybou při měření tloušťky vrstvy, nebo skutečně nejsou průměry vláken závislé na zaplnění v rozsahu daných vzorků.



### **Experiment 3: Filtrační vlastnosti a velikosti pórů na základě experimentu**

V první části experimentu 3 bylo postupně prováděno testování filtračních vlastností aerosolem NaCl pro zjištění efektivity zachycených částic a tlakového spádu jednotlivých filtrů. Naměřené filtrační vlastnosti jsou uvedeny v tabulkách. Tab. 6 představuje statistická data efektivity zachycených částic filtrů a tab. 7 představuje statistická data tlakového spádu filtrů. Z naměřených hodnot vyplývá, že se zvyšující se hodnotou efektivity filtrace jednotlivých vzorků roste i tlakový spád těchto vzorků.

V druhé části experimentu 3 byly vzorky postupně testovány na velikosti póru bublinkovou metodou. Tato metoda určuje velikosti póru ve filtru nepřímo. Cílem experimentu bylo určit velikosti pórů na základě experimentu. Všechny vzorky byly několikrát proměřeny, z naměřených hodnot byly sestaveny grafy, z nichž byly odečtené hodnoty použity pro výpočty průměrů pórů. Získané hodnoty průměrů pórů jsou uvedeny v tab. 8. Největší průměr póru na základě experimentu obsahuje vzorek 1.

### **Experiment 4: Strukturní parametry ve vztahu s filtračními vlastnostmi**

Experiment 4 se zabýval strukturními parametry ve vztahu s filtračními vlastnostmi. Jednotlivé grafy znázorňují závislosti filtračních vlastností na strukturních parametrech. Závislost efektivity filtrace na zaplnění (graf 7) a závislost tlakového spádu na zaplnění (graf 8). Z grafu 7 vyplývá, že se zvyšující se hodnotou zaplnění vzorku roste efektivita zachycených částic. Tento průběh odpovídá předpokládanému vlivu zaplnění, kdy se nárůst efektivity postupně zpomaluje. Z grafu 8 je patrné, že data nevykazují jasný průběh. Je to dáno především odlišnou jemností vláken vzorku 5, kde větší specifický povrch vláken působí více na brzdění proudu vzduchu a tím i na růst tlakového spádu.

### **Experiment 5: Velikosti pórů na základě výpočtů a určení vhodné materiálové konstanty**

Na rozdíl od experimentu 3, v němž bylo nutné určit velikosti pórů na základě experimentu, bylo v tomto experimentu 5 nutné zjistit velikosti pórů na základě výpočtů.

V první části experimentu byly průměry pórů všech vzorků vypočteny dle vzorců z jednotlivých variant, kdy parametr  $k = 1$  [-] byl u všech výpočtů konstantní. Nezbytnou součástí k některým výpočtům, především pro výpočty průměrů pórů z varianty III., bylo třeba určit vhodnou materiálovou konstantu  $a = 0,4$  [-]. Tato konstanta byla pro výpočty

průměrů pórů všech vzorků z varianty III. konstantní. Vypočtené hodnoty průměrů pórů ukazuje tab. 9. Objemový povrch vláken a výpočty parametru  $k [-]$  dle rovnice Carman – Kozeny znázorňuje tab. 10. Hodnoty parametru  $k [-]$  z této rovnice se staly pouze výchozími hodnotami pro porovnání s výpočty parametru  $k [-]$  dle jednotlivých variant. Pro další část experimentu nebylo třeba tyto hodnoty dále používat.

V druhé části experimentu byl parametr  $k [-]$  pro výpočty průměrů pórů z jednotlivých variant různý, v závislosti na velikostech pórů určených experimentálně a na výpočtech průměrů pórů při parametru  $k = 1 [-]$ . Parametry  $k [-]$  a průměrné hodnoty parametru  $k [-]$  všech 5-ti a 3 vybraných vzorků ukazuje tab. 11. Hodnoty výpočtů průměrů pórů všech 5-ti vzorků, jejichž průměrná hodnota parametru  $k [-]$  byla pro výpočty průměrů pórů z jednotlivých variant různá, představuje tab. 12. Hodnoty výpočtů průměrů pórů již 3 vybraných vzorků, jejichž průměrná hodnota parametru  $k [-]$  byla pro výpočty průměrů pórů z jednotlivých variant také různá, představuje tab. 13. Graf 9 zobrazuje závislost průměru póru na zaplnění všech 5-ti vzorků. Z grafu 9 je zřejmé, že některé hodnoty se výrazně vychylují, což je dáno odlišnými parametry jednotlivých vzorků. Graf 10 zobrazuje závislost průměru póru na zaplnění 3 vybraných vzorků. Vzorky 2, 3 a 4 byly vybrány z toho důvodu, že hodnoty průměrů vláken byly téměř konstantní, odlišovaly se od sebe pouze v setinách. Proto bylo možné tyto 3 vybrané vzorky jednoznačně porovnávat.

Poslední část experimentu 5 se týkala závislosti filtračních vlastností na velikosti pórů na základě výpočtu. Byly vytvořeny 2 grafy závislostí filtračních vlastností na průměru póru získané výpočtem z varianty II. Hodnoty výpočtů průměrů pórů z varianty II. se ze všech 3 variant nejvíce přibližovaly hodnotám póru naměřeného, proto se hodnoty výpočtů průměrů pórů z var. II. staly výchozími pro vytvoření grafů. Závislost efektivity zachycených částic na průměru póru získaného výpočtem z varianty II. s použitím vhodné průměrné hodnoty parametru  $k [-]$ , znázorňuje graf 11. Z grafu je patrné, že s klesající efektivitou zachycených částic jednotlivých vzorků se vypočtené hodnoty průměrů pórů jednotlivých vzorků zvyšují. Zařízení pro měření filtračních vlastností aerosolem NaCl měří odlučivost polydisperzních částic o velikosti od 0,02 do 2  $\mu\text{m}$ , tudíž z grafu je zřejmé že efektivita zachycených částic klesá u vzorků jejichž průměr póru je větší než 2  $\mu\text{m}$ , zejména u vzorku 3, vzorku 2 a vzorku 1. Tento fakt je nepřímým důkazem správnosti vypočítaných hodnot velikosti póru. Závislost tlakového spádu na průměru póru získaného výpočtem s použitím vhodné průměrné hodnoty parametru  $k [-]$ , znázorňuje graf 12. Z grafu je zřejmé, že s klesajícím tlakovým spádem jednotlivých vzorků se vypočtené hodnoty průměrů pórů jednotlivých vzorků zvyšují. Obecně lze tedy říci, že s klesajícími hodnotami filtračních vlastností jednotlivých vzorků se hodnoty průměru póru zvyšují a naopak.

## 5 ZÁVĚR

Hlavním cílem této diplomové práce bylo u vybraných vzorků experimentálně vyhodnotit strukturní parametry a filtrační vlastnosti, porovnat vztah mezi strukturními parametry a filtračními vlastnostmi zjištěnými na základě experimentu a na základě výpočtu. Z praktického hlediska se jedná o otázku, zda je možné na základě strukturních parametrů predikovat výsledné vlastnosti. Hlavní důraz byl kladen na určení vhodné materiálové konstanty pro výpočet velikosti pórů na základě znalosti ostatních parametrů.

K dispozici pro všechny prováděné experimenty bylo 5 vzorků. Vrstvy všech vzorků byly tvořeny papírovým podkladem z filtračního papíru, na němž byla metodou electrospinning nanosená nanovlákněná vrstva polyamidu. Jednotlivé vrstvy se od sebe lišily filtračními vlastnostmi i strukturními parametry. Především byly určeny průměry vláken, tloušťky vrstvy, průměry pórů, zaplnění, jemnosti vláken, objemový povrch vláken, poróznost, průřez póru, odpor vůči toku, tlakový spád, efektivita zachycených částic při procesu filtrace.

V rámci experimentů byly u jednotlivých vzorků sledovány změny hodnot zjištěných experimentálně i na základě výpočtu. Na základě experimentu byly určeny průměry vláken, tloušťky vrstvy, průměry pórů, tlakový spád, efektivita zachycených částic při procesu filtrace. Zaplnění, jemnosti vláken, objemový povrch vláken, poróznost, průřez póru, odpor vůči toku, průměry pórů byly určeny na základě výpočtu. Efektivita zachycených částic byla určena pouze na základě experimentu, ale bylo by možné ji určit i na základě výpočtu. Vztah pro výpočet efektivit zachycených částic při procesu filtrace je dosti složitý, mechanismy filtrace jsou komplikované, proto jej nelze vyjádřit a výpočty pro určení efektivit zachycených částic se neprovádí. Také byly sledovány závislosti filtračních vlastností, zejména efektivita zachycených částic a tlakový spád, na zaplnění.

Z experimentů vyplývá, že z celkem 5-ti testovaných vzorků měly vzorky 2, 3 a 4 s nanosenou nanovlákněnou vrstvou polyamidu téměř konstantní hodnoty průměrů vláken, jemností vláken a objemového povrchu vláken. Z toho důvodu bylo možné tyto 3 vzorky jednoznačně porovnávat. Naopak průměry pórů, tloušťky nanosených vrstev a další strukturní parametry všech testovaných vzorků se svými hodnotami od sebe různě odlišovaly. U vzorku 4 byl zaznamenán velký rozptyl naměřených hodnot tloušťky nanovlákněné vrstvy, jež byl způsoben nerovnoměrností popř. nerovnoběžností povrchu vzorku. Průměry pórů byly zjištěny na základě experimentu a na základě výpočtu z jednotlivých variant. Pro výpočty průměrů pórů všech 5-ti vzorků byl nejprve parametr  $k$  pro všechny výpočty ze všech variant konstantní. Pro výpočty průměrů pórů všech 5-ti vzorků a následně 3 vybraných vzorků, jež se staly výchozími pro vytvoření grafů závislostí průměrů pórů na zaplnění, byla pro každou variantu zvolena různá průměrná hodnota parametru  $k$ . Pro určení průměrů pórů nanovlákněných vrstev z varianty III. bylo nutné určit vhodný

parametr  $a$ , jež byl pro všechny vzorky konstantní. Cílem bylo odhadnout vhodné parametry, aby se vypočtené hodnoty velikosti póru co nejvíce přibližovaly hodnotám velikosti póru naměřeného, v závislosti průměru póru na zaplnění.

Ze všech prováděných experimentů nelze konat obecné závěry, neboť hodnoty strukturních parametrů a filtračních vlastností získány experimentálně či výpočtem byly u nanovlákněné polyamidové vrstvy každého vzorku odlišné. Pouze vzorky 2, 3 a 4 svými hodnotami některých strukturních parametrů byly téměř konstantní, proto bylo možné tyto 3 vybrané vzorky porovnávat. Z porovnání naměřených dat filtračních vlastností a velikosti průměrného póru lze usuzovat, že výpočet velikosti póru dle vztahu (31) lze použít pro hrubý odhad filtračních vlastností nanovlákněné vrstvy.

Tato diplomová práce by mohla být příspěvkem pro další experimenty k hodnocení jiných druhů materiálů.

## 6 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BROWN, R. C. 1993: *Air filtration*. 1<sup>st</sup> edition. Sheffield, 1993. ISBN 0 08 041274 2
- [2] Definice filtrace: *Otevřená encyklopedie* [online], [cit. 2010-04-12]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Filtrace>>.
- [3] Hrůza, J.: *Zlepšování filtračních vlastností vláknenných materiálů*, TUL Liberec, disertační práce, 2006
- [4] Hrůza, J.: *Filtrace a filtrační materiály*. Katedra netkaných textilií [online], [cit. 2010-04-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.ft.tul.cz/depart/knt/nove/dokumenty/studmaterialy/filtr.pdf>>.
- [5] PICH, J. 1987: *Gas filtration theory*, edited by M.J. Matteson and C. Orr, published by Marcel Dekker, inc. New York 1987, 1-132.
- [6] RICHTER, M 2002.: *Technologie ochrany životního prostředí*. Univerzita J.E. Purkyně, Ústí nad Labem 2002.
- [7] PICH, J. 1964: *Teorie filtrace*. Kandidátská disertační práce. ČSAV Praha 1964
- [8] Prodyšnost vzduchu: TUL Liberec, *Katedra netkaných textilií* [online], [cit. 2010-04-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.ft.tul.cz/depart/knt/nove/dokumenty/podklady/mit/mit9.pdf>>.
- [9] EN 779 2003. *Particulate air filters for general ventilation*. Requirements, testing, marking. European Comitee for Standardization, Bruxelles, Belgium, 1993.
- [10] Neckář, B., *Morfologie a strukturní mechanika obecných vláknenných útvarů*. Skriptum TU Liberec. TU Liberec, 1998
- [11] MORÁVEK, P. 2005: *Problémy mikroklimatu obytných domů*. Můj dům, květen 2005.

- [12] Hrůza, J.: *Přednáška Filtration 3*. TUL Liberec, Katedra netkaných textilií [online], [cit. 2010-04-13]. Dostupné z WWW:  
<<http://www.ft.tul.cz/depart/knt/nove/dokumenty/studmaterialy/tpa/filtration3.ppt>>.
- [13] Hrůza, J.: *Přednáška Filtration 2*. TUL Liberec, Katedra netkaných textilií [online], [cit. 2010-04-13]. Dostupné z WWW:  
<<http://www.ft.tul.cz/depart/knt/nove/dokumenty/studmaterialy/tpa/filtration2.ppt>>.
- [14] W.C. Hinds, *Aerosol Technology*, second ed., Wiley-Interscience, New York, 1998. [online], [cit. 2010-04-15]. Dostupné z WWW: <[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)>.
- [15] Neckář, B.: *Příze. Tvorba, struktura, vlastnosti*. SNTL Praha 1990
- [16] Neckář B.: *Vlákna a vlákenné útvary 1, 2*. Odkazy STR01p, STR02p. TUL Liberec, Katedra textilních technologií [online], [cit. 2010-04-20]. Dostupné z WWW:  
<[http://www.ktt.tul.cz/index.php?page=predmety&action=detail&id\\_predmet=30](http://www.ktt.tul.cz/index.php?page=predmety&action=detail&id_predmet=30)>.
- [17] Nanovlákná – materiál budoucnosti [online], [cit. 2010-04-15]. Dostupné z WWW:  
<<http://www.inovace.cz/for-high-tech/nanotechnologie/clanek/nanovlakna-material-budoucnosti-/>>.
- [18] Nanovlákná, technologie výroby [online], [cit. 2010-04-15]. Dostupné z WWW:  
<<http://www.elmarco.com/technology/charakteristika-nanovlaken/>>.
- [19] Hrůza, J.: *Nanovláknenné filtry a jejich použití v sanačních technologiích* [online], [cit.2010-04-16]. Dostupné z WWW: <<http://centrum-sanace.cs.cas.cz/download/tmp.Mvkb4KX/upload-ARTEC-kapitola6-sidlof-hruza.pdf>>.
- [20] Nanovlákná – vlastnosti a použití: *Nanotextilie* [online], [cit.2010-04-16]. Dostupné z WWW: <<http://alice.fiserovi.cz/wp-content/uploads/2007/06/nanotextilie.pdf>>.
- [21] Nanovlákná: *Otevřená encyklopedie* [online], [cit.2010-04-15]. Dostupné z WWW:  
<<http://cs.wikipedia.org/wiki/Nanovlákná>>.

- [22] Testování filtrace: TUL Liberec, *Katedra netkaných textilií* [online], [cit.2010-04-30].  
Dostupné z WWW:  
<[http://www.ft.tul.cz/index.cgi?sou=science/laboratore/knt-testovani\\_filtrace.htm](http://www.ft.tul.cz/index.cgi?sou=science/laboratore/knt-testovani_filtrace.htm)>.
- [23] Cvičení 2 porozita: TUL Liberec, *Katedra netkaných textilií* [online], [cit.2010-05-03].  
Dostupné z WWW:  
<[http://www.ft.vslib.cz/depart/knt/web/index.php?option=com\\_docman&task=cat\\_view&gid=53&dir=DESC&order=name&Itemid=53&limit=5&limitstart=10](http://www.ft.vslib.cz/depart/knt/web/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=53&dir=DESC&order=name&Itemid=53&limit=5&limitstart=10)>.

## **7 SEZNAM PŘÍLOH**

PŘÍLOHA 1: Průměry vláken a tloušťky vrstvy

PŘÍLOHA 2: Strukturní parametry nanovláknenné vrstvy na základě výpočtu

PŘÍLOHA 3: Průměry pórů



## PŘÍLOHA 1: Průměry vláken a tloušťky vrstvy

### Průměry vláken

#### Vzorek 1:

Naměřené průměry vláken

Položka	Délka [ $\mu\text{m}$ ]	Položka	Délka [ $\mu\text{m}$ ]	Položka	Délka [ $\mu\text{m}$ ]	Položka	Délka [ $\mu\text{m}$ ]
1.	0,4	31.	0,3	61.	0,2	91.	0,25
2.	0,3	32.	0,4	62.	0,2	92.	0,22
3.	0,3	33.	0,2	63.	0,3	93.	0,13
4.	0,3	34.	0,4	64.	0,3	94.	0,14
5.	0,3	35.	0,2	65.	0,2	95.	0,16
6.	0,3	36.	0,4	66.	0,2	96.	0,34
7.	0,3	37.	0,2	67.	0,2	97.	0,21
8.	0,2	38.	0,2	68.	0,2	98.	0,17
9.	0,3	39.	0,3	69.	0,2	99.	0,23
10.	0,4	40.	0,3	70.	0,09	100.	0,16
11.	0,3	41.	0,2	71.	0,24		
12.	0,3	42.	0,3	72.	0,22		
13.	0,3	43.	0,3	73.	0,31		
14.	0,4	44.	0,3	74.	0,28		
15.	0,4	45.	0,3	75.	0,37		
16.	0,3	46.	0,4	76.	0,26		
17.	0,3	47.	0,3	77.	0,27		
18.	0,2	48.	0,2	78.	0,22		
19.	0,2	49.	0,1	79.	0,28		
20.	0,3	50.	0,2	80.	0,19		
21.	0,3	51.	0,2	81.	0,21		
22.	0,3	52.	0,2	82.	0,21		
23.	0,2	53.	0,1	83.	0,3		
24.	0,3	54.	0,2	84.	0,21		
25.	0,3	55.	0,2	85.	0,19		
26.	0,4	56.	0,2	86.	0,16		
27.	0,3	57.	0,3	87.	0,28		
28.	0,3	58.	0,2	88.	0,41		
29.	0,4	59.	0,2	89.	0,26		
30.	0,3	60.	0,2	90.	0,27		

Souhrn naměřených hodnot

Příznak	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Minimum	Maximum
Délka [ $\mu\text{m}$ ]	0,26	0,07	0,09	0,41

Naměřené četnosti průměrů vláken

Číslo třídy	1.	2.	3.	4.	5.
Rozsah třídy [ $\mu\text{m}$ ]	0 – 0,1	0,1 – 0,2	0,2 – 0,3	0,3 – 0,4	0,4 – 0,5
Relativní četnost [-]	0,01	0,10	0,43	0,35	0,11

## Průměry vláken

### Vzorek 2:

Naměřené průměry vláken

Položka	Délka [ $\mu\text{m}$ ]	Položka	Délka [ $\mu\text{m}$ ]	Položka	Délka [ $\mu\text{m}$ ]	Položka	Délka [ $\mu\text{m}$ ]
1.	0,4	31.	0,2	61.	0,5	91.	0,2
2.	0,4	32.	0,3	62.	0,4	92.	0,2
3.	0,4	33.	0,3	63.	0,4	93.	0,3
4.	0,6	34.	0,4	64.	0,2	94.	0,2
5.	0,3	35.	0,4	65.	0,4	95.	0,4
6.	0,3	36.	0,3	66.	0,3	96.	0,3
7.	0,5	37.	0,5	67.	0,4	97.	0,3
8.	0,3	38.	0,4	68.	0,3	98.	0,2
9.	0,3	39.	0,3	69.	0,4	99.	0,2
10.	0,4	40.	0,5	70.	0,4	100.	0,2
11.	0,5	41.	0,4	71.	0,5		
12.	0,4	42.	0,2	72.	0,2		
13.	0,4	43.	0,2	73.	0,3		
14.	0,3	44.	0,4	74.	0,3		
15.	0,5	45.	0,3	75.	0,2		
16.	0,4	46.	0,4	76.	0,3		
17.	0,3	47.	0,3	77.	0,3		
18.	0,4	48.	0,3	78.	0,3		
19.	0,5	49.	0,2	79.	0,3		
20.	0,4	50.	0,3	80.	0,3		
21.	0,4	51.	0,3	81.	0,4		
22.	0,5	52.	0,3	82.	0,3		
23.	0,2	53.	0,3	83.	0,3		
24.	0,3	54.	0,3	84.	0,4		
25.	0,3	55.	0,3	85.	0,5		
26.	0,4	56.	0,3	86.	0,4		
27.	0,3	57.	0,5	87.	0,4		
28.	0,3	58.	0,3	88.	0,3		
29.	0,3	59.	0,3	89.	0,2		
30.	0,2	60.	0,4	90.	0,3		

Souhrn naměřených hodnot

Příznak	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Minimum	Maximum
Délka [ $\mu\text{m}$ ]	0,34	0,09	0,20	0,60

Naměřené četnosti průměrů vláken

Číslo třídy	1.	2.	3.	4.
Rozsah třídy [ $\mu\text{m}$ ]	0,2 – 0,3	0,3 – 0,4	0,4 – 0,5	0,5 – 0,6
Relativní četnost [-]	0,16	0,43	0,29	0,12

## Průměry vláken

### Vzorek 3:

Naměřené průměry vláken

Položka	Délka [ $\mu\text{m}$ ]	Položka	Délka [ $\mu\text{m}$ ]	Položka	Délka [ $\mu\text{m}$ ]	Položka	Délka [ $\mu\text{m}$ ]
1.	0,4	31.	0,3	61.	0,5	91.	0,4
2.	0,5	32.	0,3	62.	0,4	92.	0,2
3.	0,4	33.	0,3	63.	0,3	93.	0,2
4.	0,4	34.	0,4	64.	0,5	94.	0,3
5.	0,3	35.	0,3	65.	0,3	95.	0,4
6.	0,3	36.	0,3	66.	0,4	96.	0,3
7.	0,4	37.	0,5	67.	0,4	97.	0,3
8.	0,3	38.	0,4	68.	0,4	98.	0,3
9.	0,4	39.	0,2	69.	0,5	99.	0,3
10.	0,3	40.	0,4	70.	0,3	100.	0,3
11.	0,4	41.	0,4	71.	0,3		
12.	0,5	42.	0,2	72.	0,5		
13.	0,4	43.	0,5	73.	0,4		
14.	0,4	44.	0,4	74.	0,5		
15.	0,3	45.	0,4	75.	0,3		
16.	0,3	46.	0,3	76.	0,5		
17.	0,3	47.	0,2	77.	0,3		
18.	0,3	48.	0,4	78.	0,3		
19.	0,3	49.	0,4	79.	0,4		
20.	0,2	50.	0,3	80.	0,4		
21.	0,3	51.	0,4	81.	0,4		
22.	0,3	52.	0,3	82.	0,3		
23.	0,4	53.	0,3	83.	0,3		
24.	0,3	54.	0,4	84.	0,4		
25.	0,3	55.	0,3	85.	0,3		
26.	0,4	56.	0,4	86.	0,4		
27.	0,3	57.	0,4	87.	0,3		
28.	0,4	58.	0,4	88.	0,4		
29.	0,4	59.	0,4	89.	0,2		
30.	0,3	60.	0,4	90.	0,4		

Souhrn naměřených hodnot

Příznak	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Minimum	Maximum
Délka [ $\mu\text{m}$ ]	0,35	0,08	0,20	0,50

Naměřené četnosti průměrů vláken

Číslo třídy	1.	2.	3.	4.
Rozsah třídy [ $\mu\text{m}$ ]	0,2 – 0,3	0,3 – 0,4	0,4 – 0,5	0,5 – 0,6
Relativní četnost [-]	0,07	0,42	0,41	0,10

## Průměry vláken

### Vzorek 4:

Naměřené průměry vláken

Položka	Délka [ $\mu\text{m}$ ]	Položka	Délka [ $\mu\text{m}$ ]	Položka	Délka [ $\mu\text{m}$ ]	Položka	Délka [ $\mu\text{m}$ ]
1.	0,4	31.	0,4	61.	0,3	91.	0,4
2.	0,4	32.	0,4	62.	0,4	92.	0,5
3.	0,3	33.	0,5	63.	0,3	93.	0,3
4.	0,4	34.	0,4	64.	0,3	94.	0,6
5.	0,3	35.	0,3	65.	0,4	95.	0,5
6.	0,3	36.	0,3	66.	0,3	96.	0,5
7.	0,3	37.	0,4	67.	0,4	97.	0,4
8.	0,4	38.	0,3	68.	0,3	98.	0,5
9.	0,4	39.	0,4	69.	0,3	99.	0,6
10.	0,4	40.	0,4	70.	0,5	100.	0,6
11.	0,4	41.	0,3	71.	0,3		
12.	0,4	42.	0,3	72.	0,4		
13.	0,3	43.	0,3	73.	0,4		
14.	0,3	44.	0,3	74.	0,2		
15.	0,4	45.	0,3	75.	0,3		
16.	0,4	46.	0,3	76.	0,4		
17.	0,3	47.	0,3	77.	0,3		
18.	0,4	48.	0,4	78.	0,2		
19.	0,3	49.	0,3	79.	0,4		
20.	0,3	50.	0,4	80.	0,3		
21.	0,4	51.	0,3	81.	0,3		
22.	0,4	52.	0,3	82.	0,4		
23.	0,3	53.	0,4	83.	0,2		
24.	0,3	54.	0,4	84.	0,4		
25.	0,2	55.	0,4	85.	0,2		
26.	0,4	56.	0,4	86.	0,4		
27.	0,3	57.	0,2	87.	0,4		
28.	0,5	58.	0,3	88.	0,4		
29.	0,4	59.	0,4	89.	0,3		
30.	0,3	60.	0,3	90.	0,5		

Souhrn naměřených hodnot

Příznak	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Minimum	Maximum
Délka [ $\mu\text{m}$ ]	0,36	0,08	0,20	0,60

Naměřené četnosti průměrů vláken

Číslo třídy	1.	2.	3.	4.	5.
Rozsah třídy [ $\mu\text{m}$ ]	0,2 – 0,3	0,3 – 0,4	0,4 – 0,5	0,5 – 0,6	0,6 – 0,7
Relativní četnost [-]	0,06	0,41	0,42	0,08	0,03

## Průměry vláken

### Vzorek 5:

Naměřené průměry vláken

Položka	Délka [ $\mu\text{m}$ ]	Položka	Délka [ $\mu\text{m}$ ]	Položka	Délka [ $\mu\text{m}$ ]	Položka	Délka [ $\mu\text{m}$ ]
1.	0,1	31.	0,12	61.	0,13	91.	0,12
2.	0,08	32.	0,11	62.	0,12	92.	0,13
3.	0,08	33.	0,08	63.	0,15	93.	0,09
4.	0,12	34.	0,08	64.	0,11	94.	0,08
5.	0,09	35.	0,08	65.	0,09	95.	0,08
6.	0,12	36.	0,13	66.	0,13	96.	0,11
7.	0,12	37.	0,15	67.	0,07	97.	0,08
8.	0,11	38.	0,08	68.	0,08	98.	0,1
9.	0,11	39.	0,11	69.	0,08	99.	0,08
10.	0,13	40.	0,13	70.	0,11	100.	0,09
11.	0,09	41.	0,13	71.	0,12		
12.	0,09	42.	0,14	72.	0,13		
13.	0,11	43.	0,08	73.	0,08		
14.	0,15	44.	0,09	74.	0,06		
15.	0,11	45.	0,09	75.	0,09		
16.	0,13	46.	0,08	76.	0,13		
17.	0,09	47.	0,11	77.	0,09		
18.	0,11	48.	0,13	78.	0,11		
19.	0,12	49.	0,09	79.	0,09		
20.	0,09	50.	0,11	80.	0,11		
21.	0,13	51.	0,09	81.	0,07		
22.	0,09	52.	0,12	82.	0,08		
23.	0,12	53.	0,07	83.	0,11		
24.	0,12	54.	0,12	84.	0,11		
25.	0,09	55.	0,08	85.	0,12		
26.	0,13	56.	0,13	86.	0,07		
27.	0,13	57.	0,07	87.	0,07		
28.	0,11	58.	0,13	88.	0,09		
29.	0,11	59.	0,09	89.	0,12		
30.	0,09	60.	0,11	90.	0,09		

Souhrn naměřených hodnot

Příznak	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Minimum	Maximum
Délka [ $\mu\text{m}$ ]	0,1	0,02	0,06	0,15

Naměřené četnosti průměrů vláken

Číslo třídy	1.	2.	3.	4.	5.
Rozsah třídy [ $\mu\text{m}$ ]	0,06-0,08	0,08-0,1	0,1-0,12	0,12-0,14	0,14-0,16
Relativní četnost [-]	0,07	0,38	0,21	0,30	0,04

## Tloušťky vrstvy

### Vzorek 1:

Naměřené tloušťky nanovláknenné vrstvy

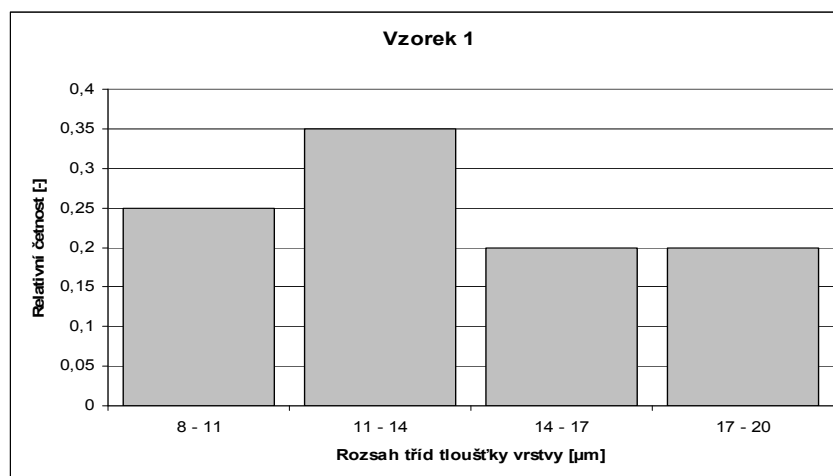
Položka	Délka [ $\mu\text{m}$ ]	Položka	Délka [ $\mu\text{m}$ ]
1.	23	11.	17
2.	24	12.	17
3.	19	13.	13
4.	23	14.	13
5.	19	15.	10
6.	13	16.	11
7.	9	17.	10
8.	8	18.	14
9.	14	19.	20
10.	15	20.	14

Souhrn naměřených hodnot

Příznak	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Minimum	Maximum
Délka [ $\mu\text{m}$ ]	15,30	4,68	8,00	24,00

Naměřené četnosti průměrů vláken

Číslo třídy	1.	2.	3.	4.
Rozsah třídy [ $\mu\text{m}$ ]	8 - 11	11 - 14	14 - 17	17 - 20
Relativní četnost [-]	0,25	0,35	0,20	0,20



*Histogram četností tloušťky vrstvy vzorku 1.*

## Tloušťky vrstvy

### Vzorek 2:

Naměřené tloušťky nanovláknenné vrstvy

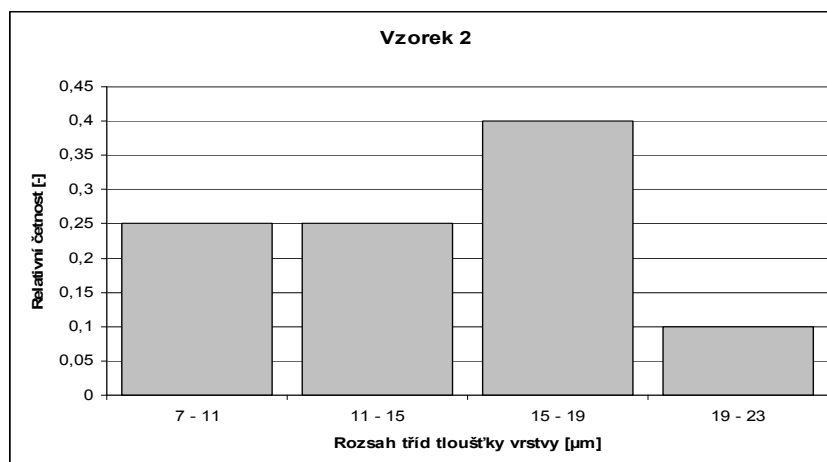
Položka	Délka [ $\mu\text{m}$ ]	Položka	Délka [ $\mu\text{m}$ ]
1.	11	11.	21
2.	17	12.	15
3.	8	13.	16
4.	10	14.	21
5.	16	15.	16
6.	11	16.	15
7.	15	17.	17
8.	9	18.	14
9.	12	19.	7
10.	10	20.	13

Souhrn naměřených hodnot

Příznak	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Minimum	Maximum
Délka [ $\mu\text{m}$ ]	13,70	3,84	7,00	21,00

Naměřené četnosti průměrů vláken

Číslo třídy	1.	2.	3.	4.
Rozsah třídy [ $\mu\text{m}$ ]	7 - 11	11 - 15	15 - 19	19 - 23
Relativní četnost [-]	0,25	0,25	0,40	0,10



*Histogram četností tloušťky vrstvy vzorku 2.*

## Tloušťky vrstvy

### Vzorek 3:

Naměřené tloušťky nanovláknenné vrstvy

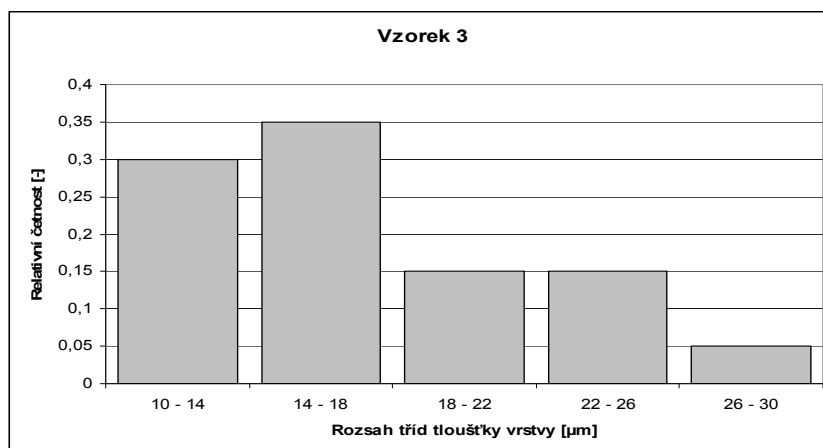
Položka	Délka [ $\mu\text{m}$ ]	Položka	Délka [ $\mu\text{m}$ ]
1.	13	11.	21
2.	16	12.	12
3.	16	13.	10
4.	27	14.	14
5.	23	15.	12
6.	12	16.	16
7.	17	17.	18
8.	13	18.	22
9.	17	19.	16
10.	23	20.	21

Souhrn naměřených hodnot

Příznak	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Minimum	Maximum
Délka [ $\mu\text{m}$ ]	16,95	4,47	10,00	27,00

Naměřené četnosti průměrů vláken

Číslo třídy	1.	2.	3.	4.	5.
Rozsah třídy [ $\mu\text{m}$ ]	10 - 14	14 - 18	18 - 22	22 - 26	26 - 30
Relativní četnost [-]	0,30	0,35	0,15	0,15	0,05



*Histogram četností tloušťky vrstvy vzorku 3.*



## Tloušťky vrstvy

### Vzorek 4:

Naměřené tloušťky nanovláknenné vrstvy

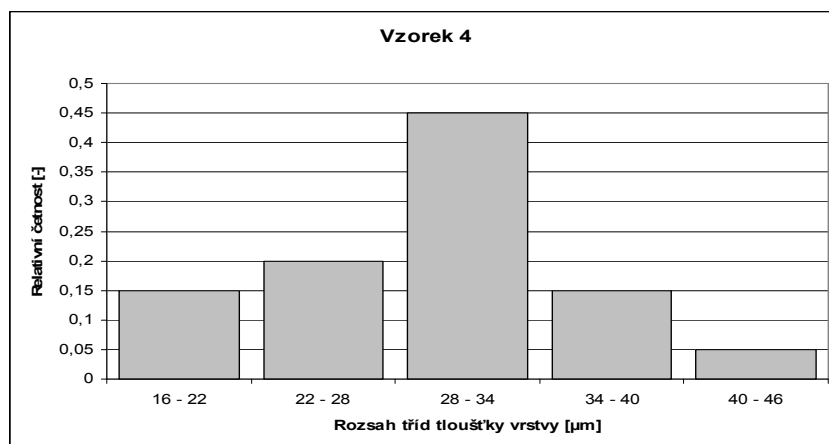
Položka	Délka [ $\mu\text{m}$ ]	Položka	Délka [ $\mu\text{m}$ ]
1.	39	11.	28
2.	37	12.	40
3.	16	13.	39
4.	27	14.	24
5.	29	15.	28
6.	25	16.	20
7.	33	17.	32
8.	21	18.	29
9.	30	19.	27
10.	32	20.	32

Souhrn naměřených hodnot

Příznak	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Minimum	Maximum
Délka [ $\mu\text{m}$ ]	29,40	6,29	16,00	40,00

Naměřené četnosti průměrů vláken

Číslo třídy	1.	2.	3.	4.	5.
Rozsah třídy [ $\mu\text{m}$ ]	16 - 22	22 - 28	28 - 34	34 - 40	40 - 46
Relativní četnost [-]	0,15	0,20	0,45	0,15	0,05



*Histogram četností tloušťky vrstvy vzorku 4.*

## Tloušťky vrstvy

### Vzorek 5:

Naměřené tloušťky nanovlákněné vrstvy

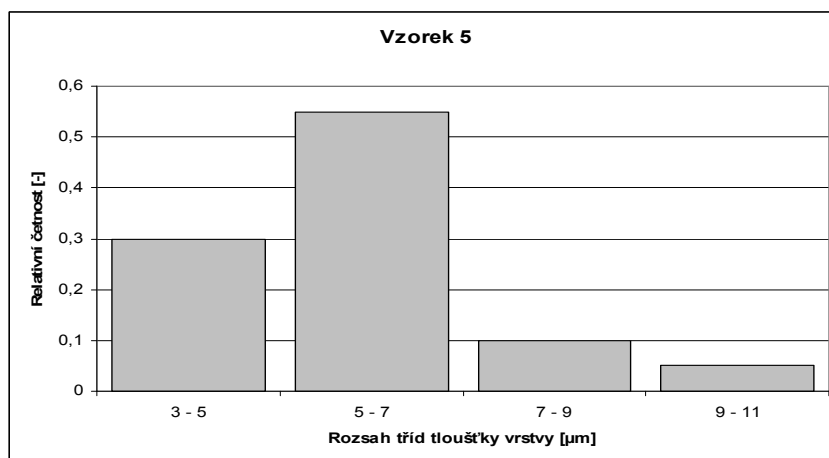
Položka	Délka [ $\mu\text{m}$ ]	Položka	Délka [ $\mu\text{m}$ ]
1.	4	11.	9
2.	3	12.	7
3.	3	13.	6
4.	6	14.	4
5.	5	15.	5
6.	4	16.	5
7.	5	17.	5
8.	6	18.	6
9.	6	19.	4
10.	8	20.	6

Souhrn naměřených hodnot

Příznak	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Minimum	Maximum
Délka [ $\mu\text{m}$ ]	5,35	1,49	3,00	9,00

Naměřené četnosti průměrů vláken

Číslo třídy	1.	2.	3.	4.
Rozsah třídy [ $\mu\text{m}$ ]	3 - 5	5 - 7	7 - 9	9 - 11
Relativní četnost [-]	0,30	0,55	0,10	0,05



*Histogram četností tloušťky vrstvy vzorku 5.*

## PŘÍLOHA 2: Strukturní parametry nanovláknenné vrstvy na základě výpočtu

Plošná hmotnost zjištěna na základě vážení s následným výpočtem

Počet získaných hodnot	Plošné hmotnosti vzorku 1 $m_p$ [g/m <sup>2</sup> ]	Plošné hmotnosti vzorku 2 $m_p$ [g/m <sup>2</sup> ]	Plošné hmotnosti vzorku 3 $m_p$ [g/m <sup>2</sup> ]	Plošné hmotnosti vzorku 4 $m_p$ [g/m <sup>2</sup> ]	Plošné hmotnosti vzorku 5 $m_p$ [g/m <sup>2</sup> ]
1.	0,316	0,628	0,973	3,942	0,430
2.	0,309	0,631	0,970	3,944	0,429
3.	0,312	0,627	0,969	3,944	0,430
4.	0,316	0,631	0,974	3,942	0,428
5.	0,317	0,628	0,969	3,943	0,428
Průměrná hodnota	0,314	0,629	0,971	3,943	0,429

Souhrn hodnot průměrné plošné hmotnosti všech vzorků

Testované filtry	Průměrná plošná hmotnost $m_p$ [g/m <sup>2</sup> ]	Směrodatná odchylka $\sigma$ [g/m <sup>2</sup> ]	95% IS [g/m <sup>2</sup> ]	IS min. [g/m <sup>2</sup> ]	IS max. [g/m <sup>2</sup> ]
Vzorek 1	0,314	0,003	0,003	0,311	0,317
Vzorek 2	0,629	0,002	0,002	0,627	0,631
Vzorek 3	0,971	0,002	0,002	0,969	0,973
Vzorek 4	3,943	0,001	0,001	3,942	3,944
Vzorek 5	0,429	0,001	0,001	0,428	0,430

Souhrn hodnot průměrné tloušťky nanovláknenné vrstvy všech vzorků

Testované filtry	Průměrná tloušťka vrstvy $t$ [μm]	Směrodatná odchylka $\sigma$ [μm]	95% IS [μm]	IS min. [μm]	IS max. [μm]
Vzorek 1	15,30	4,802	2,105	13,195	17,405
Vzorek 2	13,70	3,935	1,725	11,975	15,425
Vzorek 3	16,95	4,582	2,008	14,942	18,958
Vzorek 4	29,40	6,451	2,827	26,573	32,227
Vzorek 5	5,35	1,531	0,671	4,679	6,021

Hodnoty pro výpočet minimální hodnoty objemové hmotnosti a zaplnění

Testované filtry	Minimální hodnota plošné hmotnosti $m_p$ [g/m <sup>2</sup> ]	Maximální hodnota tloušťky vrstvy [m]	Minimální hodnota objemové hmotnosti $m_v$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Minimální hodnota zaplnění $\mu$ [-]
Vzorek 1	0,309	$24 \cdot 10^{-6}$	12,875	0,011
Vzorek 2	0,627	$21 \cdot 10^{-6}$	29,857	0,026
Vzorek 3	0,969	$27 \cdot 10^{-6}$	35,889	0,031
Vzorek 4	3,942	$40 \cdot 10^{-6}$	98,550	0,086
Vzorek 5	0,428	$9 \cdot 10^{-6}$	47,556	0,042

Hodnoty pro výpočet maximální hodnoty objemové hmotnosti a zaplnění

Testované filtry	Maximální hodnota plošné hmotnosti $m_p$ [g/m <sup>2</sup> ]	Minimální hodnota tloušťky vrstvy [m]	Maximální hodnota objemové hmotnosti $m_v$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Maximální hodnota zaplnění $\mu$ [-]
Vzorek 1	0,317	$8 \cdot 10^{-6}$	39,625	0,035
Vzorek 2	0,631	$7 \cdot 10^{-6}$	90,143	0,079
Vzorek 3	0,974	$10 \cdot 10^{-6}$	97,400	0,085
Vzorek 4	3,944	$16 \cdot 10^{-6}$	246,500	0,216
Vzorek 5	0,430	$3 \cdot 10^{-6}$	143,333	0,126

Průměrné hodnoty zaplnění a jeho odchylky

Testované filtry	Průměrná hodnota zaplnění [-]	Minimální hodnota zaplnění [-]	Maximální hodnota zaplnění [-]
Vzorek 1	0,018	0,011	0,035
Vzorek 2	0,040	0,026	0,079
Vzorek 3	0,050	0,031	0,085
Vzorek 4	0,118	0,086	0,216
Vzorek 5	0,070	0,042	0,126

### Výpočty minimálních hodnot objemové hmotnosti a zaplnění všech vzorků:

Minimální hodnota objemové hmotnosti vrstvy je dána poměrem minimální hodnoty plošné hmotnosti vrstvy daného vzorku s maximální hodnotou naměřené tloušťky vrstvy téhož vzorku.

Zaplnění dle vztahu (10) je dáno poměrem minimální měrné hmotnosti vrstvy ku měrné hmotnosti polyamidu -  $\rho_{PAD} = 1140 \text{ kg/m}^3$ .

#### Vzorek 1:

$$m_v = \frac{0,309}{24 \cdot 10^{-6}} = 12,875 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = \frac{\rho_{vl}}{\rho_{PAD}} = \frac{12,875}{1140} = 0,011 [-]$$

#### Vzorek 2:

$$m_v = \frac{0,627}{21 \cdot 10^{-6}} = 29,857 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = \frac{\rho_{vl}}{\rho_{PAD}} = \frac{29,857}{1140} = 0,026 [-]$$

#### Vzorek 3:

$$m_v = \frac{0,969}{27 \cdot 10^{-6}} = 35,889 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = \frac{\rho_{vl}}{\rho_{PAD}} = \frac{35,889}{1140} = 0,031 [-]$$

#### Vzorek 4:

$$m_v = \frac{3,942}{40 \cdot 10^{-6}} = 98,550 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = \frac{\rho_{vl}}{\rho_{PAD}} = \frac{98,550}{1140} = 0,086 [-]$$

#### Vzorek 5:

$$m_v = \frac{0,428}{9 \cdot 10^{-6}} = 47,556 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = \frac{\rho_{vl}}{\rho_{PAD}} = \frac{47,556}{1140} = 0,042 [-]$$

### Výpočty maximálních hodnot objemové hmotnosti a zaplnění všech vzorků:

Maximální hodnota objemové hmotnosti vrstvy je dána poměrem maximální hodnoty plošné hmotnosti vrstvy daného vzorku s minimální hodnotou naměřené tloušťky vrstvy téhož vzorku.

Zaplnění dle vztahu (10) je dáno poměrem maximální měrné hmotnosti vrstvy ku měrné hmotnosti polyamidu -  $\rho_{PAD} = 1140 \text{ kg/m}^3$ .

#### Vzorek 1:

$$m_v = \frac{0,317}{8 \cdot 10^{-6}} = 39,625 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = \frac{\rho_{vl}}{\rho_{PAD}} = \frac{39,625}{1140} = 0,035 \text{ [-]}$$

#### Vzorek 2:

$$m_v = \frac{0,631}{7 \cdot 10^{-6}} = 90,143 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = \frac{\rho_{vl}}{\rho_{PAD}} = \frac{90,143}{1140} = 0,079 \text{ [-]}$$

#### Vzorek 3:

$$m_v = \frac{0,974}{10 \cdot 10^{-6}} = 97,400 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = \frac{\rho_{vl}}{\rho_{PAD}} = \frac{97,400}{1140} = 0,085 \text{ [-]}$$

#### Vzorek 4:

$$m_v = \frac{3,944}{16 \cdot 10^{-6}} = 246,500 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = \frac{\rho_{vl}}{\rho_{PAD}} = \frac{246,500}{1140} = 0,216 \text{ [-]}$$

#### Vzorek 5:

$$m_v = \frac{0,430}{3 \cdot 10^{-6}} = 143,333 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = \frac{\rho_{vl}}{\rho_{PAD}} = \frac{143,333}{1140} = 0,126 \text{ [-]}$$

### **PŘÍLOHA 3: Průměry pórů**

#### **Vzorek 1:**

Průměr póru:

$$d_p(D) = \frac{4.0,029}{47000} = 2,47 \mu m$$

#### **Vzorek 2:**

Průměr póru:

$$d_p(D) = \frac{4.0,029}{56500} = 2,05 \mu m$$

#### **Vzorek 3:**

Průměr póru:

$$d_p(D) = \frac{4.0,029}{84000} = 1,38 \mu m$$

#### **Vzorek 4:**

Průměr póru:

$$d_p(D) = \frac{4.0,029}{10400} = 1,12 \mu m$$

#### **Vzorek 5:**

Průměr póru:

$$d_p(D) = \frac{4.0,029}{11500} = 1,00 \mu m$$